

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Renno Raudmäe

AVATUD ROBOTPLATVORM ROBOTONT

Magistritöö (30 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendajad:

Karl Kruusamäe

Veiko Vunder

Tartu 2019

Lühikokkuvõte

Avatud robotplatvorm Robotont

Robootika osakaal maailmas on tõusmas ning suur osa sellest tuleneb teenindusrobootikas kasutatavatest mobiilsetest platvormidest, mis tingib erakordselt suure nõudluse robootika inseneride järele.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli ROSi toetava haridusliku robotplatvormi Robotont arendamine.

Lõputöö raames seati töökorda kuus Robotont generatsioon 1 ning valmisid õppematerjalid antud platvormile. Loodi Robotont generatsioon 2 mehaanika disain, lahendus, dokumenteerimise keskkond ning toodeti 17 Robotont generatsioon kahte.

Valminud robotite töökindlust testiti mitmetes töötubades ja Tartu Ülikooli Narva Kolledžis kursusel „Robotite programmeerimine ROS vahenditega“.

CERCS: T125 Automatiseerimine, robootika, control engineering

Märksõnad: ROS, mobiilsed robotid, omniliikuvus, STEM, haridusrobootika

Abstract

Open source robotics platform Robotont

The popularity of robotics is rapidly increasing. The majority of this increase comes from mobile platforms that are used in service robotics. Consequently, more robotic engineers are needed in the field.

The aim of this master's thesis was to develop an educational robotics platform Robotont with the support of ROS.

During the final thesis two generations of robots were developed. Six robots of Robotont generation 1 were set up and instructional materials were developed to the current generation of the platform. Next, a mechanical design and solution for Robotont generation 2 were developed and 17 units were manufactured. The thesis also sets up a unified documentation system for both generation of robots.

The reliability of robots was tested in various workshops as well as during the course „Programming robots with ROS tools“ held at UT Narva College.

CERCS: T125 Automation, robotics, control engineering

Keywords: ROS, mobile robots, omnidirectional moving, STEM, educational robotics

Sisukord

Lühikokkuvõte	2
Abstract	3
Jooniste loetelu.....	6
Tabelite loetelu.....	7
Lühendid, konstandid, mõisted	8
Sissejuhatus.....	9
1 Kirjanduse ülevaade.....	10
1.1 Haridusrobotite olulisus	10
1.2 Mobiilsete platvormide osakaal maailmas	11
1.3 ROS ja selle olulisus robotikas	12
1.4 Näiteid haridusrobotikast	14
1.4.1 Robotid kui õpetajad	14
1.4.2 Robotid kui õppevahendid	14
2 TÜ ajalugu Robotexi Robotondini	18
2.1 Tartu Ülikooli Robotexi traditsioonid	18
2.2 ROSi tugi Robotexi robotplatvormile	20
3 Robotont generatsioon 1	21
3.1 Eesmärk	21
3.2 Nõuded	21
3.2.1 Nõuded projektile.....	21
3.2.2 Nõuded robotplatvormile	21
3.2.3 Nõuded juhenditele	21
3.2.4 Nõuded töötubadele	22
3.3 Disain ja lahendus	22
3.3.1 Robotont generatsioon 1 kasutamine	22
3.3.2 Üldstruktuur	22
3.3.3 Koostelahendus	24
3.3.4 Elektroonika	24
3.3.5 Tarkvara	26
3.3.6 Juhendmaterjalid	27
3.3.7 Tulemused ja järeldused	28
4 Robotont generatsioon 2	30
4.1 Eesmärk	30
4.2 Nõuded	30
4.3 Disain ja lahendus	31

4.3.1	Robotont generatsioon 2 kasutamine	31
4.3.2	Üldstruktuur	32
4.3.3	Koostelahendus	33
4.3.4	Tootmine	34
4.3.5	Elektroonika	35
4.3.6	Tarkvara ja juhendmaterjalid	35
4.3.7	Tulemused ja järeldused	36
5	Robotondi dokumentatsioon	38
5.1	Head dokumentatsiooni halduse tavad	38
5.2	Metoodika ja keskkonna valik	39
5.3	Dokumentide haldamise struktuur	40
6	Arutelu ja järeldused	42
	Kokkuvõte	43
	Viited	44
	Lisad	48
	Lisa 1	48
	Lisa 2	48
	Lihtlitsents	49

Jooniste loetelu

Joonis 1.1: Amazoni robotite statistika [4,10].	11
Joonis 1.2: Mobiilsete robotite näited, (a) Amazoni laorobot [10], (b) Starship Delivery Bot [14].	11
Joonis 1.3:ROSi kommuuni ja kasutajate aktiivsus [19–22]	13
Joonis 1.4. ROS-Industrial konsortsiumi liikmed 2019. a märtsi seisuga [25].	13
Joonis 1.5: Hariduslikud robotid, (a) WeDo [35], (b) Makeblock mbot [41], (c) EV3 Lego Mindstorms [40].	16
Joonis 1.6: Turtlebot 3 [49].	17
Joonis 2.1: Võistkond KOHUKKE võistlusrobot 2005. a [53]	18
Joonis 2.2: Võistkond OOL SÜSTEEM JA KOMPANII võistlusrobot 2005.a [54].	18
Joonis 2.3: TÜ meeskonna robot Kübaratrikk. Tüüpiline standardlahenduse näide aastal 2013; 1a ja 1b- liikumismoodul, 2a ja 2b – löögimoodul, 3 – juhtarvuti, 4 – kaameramoodul, 5 – triplajamoodul [51]	19
Joonis 2.4: Liikumisvõimekusega robotplatvorm: 1 – pardaarvuti; 2 – juhtkontroller; 3 – mootori kontrollerid; 4 – koodriga alalisvoolumootor; 5 – omniratas; 6 – polükarbonadist kere; 7 – aku; [56].	20
Joonis 3.1: Robotont gen 1 kasutamist seletav skeem	22
Joonis 3.2: Robotont gen 1 ja selle põhikomponendid: 1 – pardaarvuti; 2 – juhtkontroller; 3 – mootori kontroller; 4 – koodriga alalisvoolumootor; 5 – omniratas; 6 - Intel Realsense Sügavuskaamera; 7 – aku.	23
Joonis 3.3: Kinnituslahendused, (a) aku jaoks, (b) kaamera jaoks.	24
Joonis 3.4: Robotont gen 1 elektroonikaühendusi kirjeldav skeem [60]	25
Joonis 3.5: Valminud robotid.	29
Joonis 4.1: Robotontide ühenduvus arvutitega	31
Joonis 4.2: Robotont gen 2 ja selle põhikomponendid: 1 – pardaarvuti; 2 – juhtkontroller; 3 – mootori juhtplaat; 4 – koodriga alalisvoolumootor; 5 – omniratas; 6 – Intel Realsense Sügavuskaamera; 7 – aku; 8 – toitelahenduse plaat; 9 – toitenupp; 10 – E-Stop	32
Joonis 4.3: Robotont gen 2 3D mudel.	33
Joonis 4.4: Robotont gen 2 rattamoodul, (a) monteeritud kujul, (b) avatud vaates	34
Joonis 4.5: Robotondi tarkvara struktuur [78]	36
Joonis 4.6: 17 Robotont gen 2.	36

Tabelite loetelu

Tabel 3.1: Robotexi roboti ja Robotont gen 1 komponentide võrdlus.....	23
Tabel 4.1:Robotont gen 1 ja gen 2 võrdlus	32

Lühendid, konstandid, mõisted

AGV – *automated guided vehicle*, automatiseeritud juhitud sõiduk

BOM – *bill of materials*; materjalide ja/või komponentide nimistu

BSD – *permissive free software license*, litsentsi tüüp

CAD – *Computer Aided Design*, arvutipõhine disain

CNC – *Computer Numerical Control*; arvprogrammajuhtiv

FLL – *FIRST LEGO League*, LEGO robotitel põhinev robotika võistlus

FTP – *Focused Technical Projects*, fokuseeritud tehnilised projektid

gen – generatsioon

HITSA – Hariduse Infotehnoloogia Sihtasutus

LiDAR – *Light Detection and Ranging*, Valguse tuvastamine ja ulatus

LiPo – liitiumpolümeeraku

MVP – *minimum viable product*; miinimumnõudeid täitev toode

RGB-D – *Red-Green-Blue-Depth*, punane-roheline-sinine-sügavus

ROS – *Robot Operating System*, roboti operatsioonisüsteem

ROSCon – Iga-aastane ROSi konverents

SSH – *Secure Shell*, turvatud võrguprotokoll

STEM – *Science, Technology, Engineering, Mathematics*; teadus, tehnika, inseneeria, ja matemaatika

VNC – *Virtual Network Computing*; graafiline töölaua jagamise süsteem

WiFi – *Wireless Fidelity*, traadivaba võrk

Sissejuhatus

Robotika osakaal maailmas on järjest enam tõusmas. Ainuüksi tööstusvaldkonnas kasvas robotite müük aastal 2017 31%, luues uue rekordi juba viiendat aastat järjest [1]. Eeldatav kasv järgneval kolmel aastal on keskmiselt 14% aastas [1].

Suur osa robotika kasvust on toimumas tänu teenindusrobotikale, mille alla kuuluvad näiteks logistika, kaitsetööstuse ja sotsiaal- (*social robots*) ning majapidamisrobotid [2]. Kaitsetööstuse roboteid müüdi 2017. a ligi 12 tuhat ühikut, millest enam kui 10% olid mehitamata maismaasõidukid [2]. Logistika robotite koguarvuks on prognoositud aastatel 2019-2021 pea 500 tuhat ühikut, millest ca 40% moodustavad AGV-d (*automated guided vehicle*), majapidamisrobotite (tolmuimejad, muruniidukid, aknapuhastid jne) koguarv tõuseb samal perioodil peaaegu 40 miljoni ühikuni [2].

Aina kasvav robotlahenduste vajadus tingib erakordselt suure nõudluse nende inimeste järele, kes oskaks roboteid ehitada, hooldada ja kasutada. Seega on tarvis luua võimalused, et nii tööturule sisenejad kui ka seal juba tegutsevad inimesed saaksid omandada robotika-alased teadmised ja oskused.

Tartu Ülikooli avatud robotplatvormi Robotont eesmärk on pakkuda robotika-alaste õppematerjalide näitlikustamiseks ja praktilisteks harjutusteks universaalne katserobot. Kasutades maailmas enimlevinud robotika tarkvaraarendusplatvormi ROS, võimaldab Robotont õpetada just neid robotite kasutamise ja programmeerimisega seotud oskusi, mida koheselt tööturul rakendada.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on luua stabiilne versioon Robotont platvormist ning dokumenteerida ja seada üles avatud arenduskeskkonnad ja -tavad nii roboti mehaanika, elektroonika kui ka tarkvara kogukonnapõhiseks täiendamiseks.

Lõputöö raames seati töökorda kuus Robotont generatsioon 1 (gen 1) ning valmisid õppematerjalid antud platvormile. Loodi Robotont generatsioon 2 (gen 2) mehaanika disain, lahendus, dokumenteerimise keskkond ning toodeti 17 Robotont generatsioon kahte.

1 Kirjanduse ülevaade

1.1 Haridusrobotite olulisus

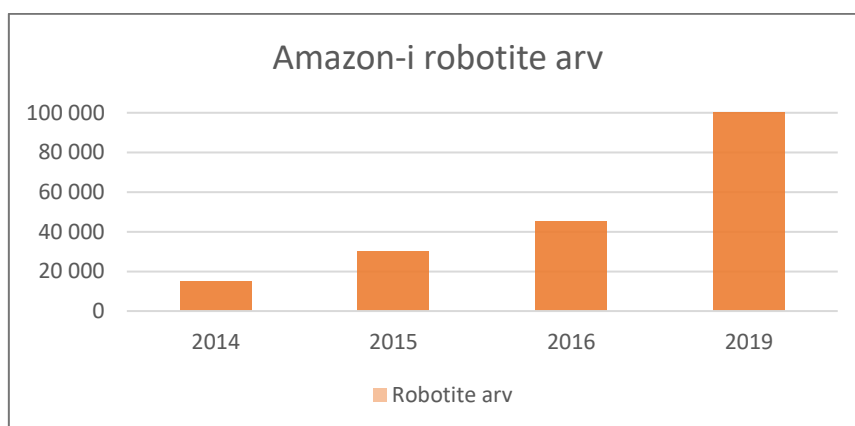
Haridusrobotika annab õpilastele võimaluse arendada sügavamat tehnoloogilist mõtlemist [3]. Disainides, konstrueerides ja programmeerides erinevaid robotika projekte ei õpi nad mitte ainult tehnoloogiat lähemalt tundma, vaid ka teadmisi rakendama [3]. Lisaks tehnoloogiaalaste teadmiste omandamisele aitavad haridusrobotid õppuril end paremini väljendada, arendavad koostööoskust ning toetavad kriitilise ja innovaatilise mõtteviisi kujundamist. Kõik eelmainitu on aluseks, et õpilane tuleks kergemini toime erinevate probleemide lahendamisega [3].

Haridusrobotika pole mitte ainult tähtis lapse arengule, vaid ka tema tulevikule. Kaasaja tööstuses kasutatakse järjest rohkem roboteid ja automatiseeritud lahendusi, mis võimaldavad kiirendada tootmisprotsessi ja säilitada töökvaliteeti [4]. Oxfordi ülikooli andmetel langevad järgmisel kümnendil 47% töökohtadest riskigruppi, mida ohustab automatiseerimine [5]. Seetõttu vajatakse tööstuses juba täna oskustega robotikainsenere, kes oskavad kasutada olemasolevaid roboteid, täiustada tuleviku tehnoloogiaid ning pakkuda sobivat väljaõpet tehnoloogia lõppkasutajatele. Selleks, et valmistada inimesi tulevikuks paremini ette, on vaja luua õppekavasid ja toetavaid õppevahendeid, mis vastaksid kaasaja tööstuse vajadustele [6].

Eestis on haridusrobotite abil robotikat aktiivselt populariseeritud juba üle 10 aasta. Panustatud on nii riiklikul tasandil, erinevate organisatsioonide kaudu kui ka kodanikualgatuse korras. MTÜ Robotika (11 tegutsemisaastat) projektijuhi Heilo Altini väitel on Eesti robotika haridus üks eesrindlikemaid maailmas, mida näitab näiteks suur osalusprotsent FLL (*FIRST LEGO League*) võistlusel [7]. Kui võtta arvesse osalevate võistkondade arv rahvaarvu kohta, siis on Eesti suutnud kaasata 1,6% kõigist õpilastest ja paigutub FLL võistlusi korraldava 80 riigi hulgas esikohale [8,9]. Hr Altini sõnul on FLL, Robotex, Robomiku lahing, Võru Roboti Tsõör vaid mõned näited erinevatest haridusrobotika võimalikest väljunditest, mida Eestis iga-aastaselt korraldatakse.

1.2 Mobiilsete platvormide osakaal maailmas

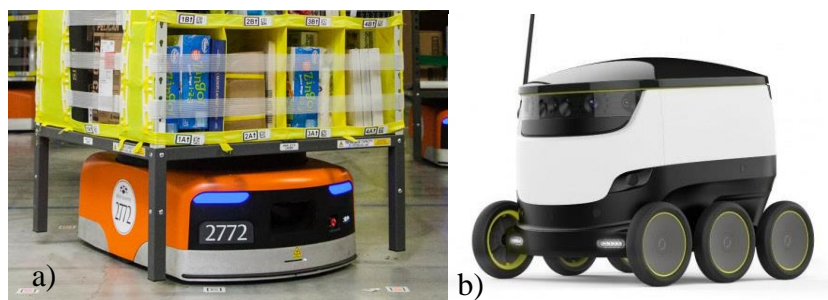
Amazoni näitel (Joonis 1.1) on näha, et autonoomselt liikuvate platvormide hulk on kasvamas. Esialgu ostis Amazon aastal 2012 ettevõtte Kiva Systems, kes automatiseeris tõstmise ja pakkimise süsteemi [4]. Alatest sellest ajast on kasutusele võetud ca 15 tuhat robotit aastas [4]. Kui 2016. aasta lõpuks oli nende ladudes kasutusel 50 tuhat robotit, siis nüüdseks on see arv kasvanud üle 100 tuhande roboti, millest enamiku moodustavad AGV-d (*automated guided vehicle* Joonis 1.2a) ehk autonoomselt juhitud liikurid [4,10] .



Joonis 1.1: Amazoni robotite statistika [4,10].

Tõusvat trendi näitavad ka ratastel liikuvad pakiveorobotid nagu näiteks Starship Technologies poolt toodetud pakiveo robot Delivery Bot (Joonis 1.2b) või Piaggio Fast Forwardi toodetud robot Gita. Selle valdkonna eeldatav turu väärtus on aastatel 2018-2024 34 miljardit USA dollarit [11].

Professionaalsete teenindusrobotite jõudsat kasvu näitavad ka n-ö sotsiaalrobotid nagu näiteks Softbank Roboticsi poolt toodetud robot Pepper või Fraunhofer IPA ja Mojin Robotics-i poolt toodetud Care-o-bot 4. On prognoositud, et aastaks 2021 on sellist tüüpi roboteid müüdud peaaegu 95 tuhat [2,12,13].



Joonis 1.2: Mobiilsete robotite näited, (a) Amazoni laorobot [10], (b) Starship Delivery Bot [14].

1.3 ROS ja selle olulisus robotikas

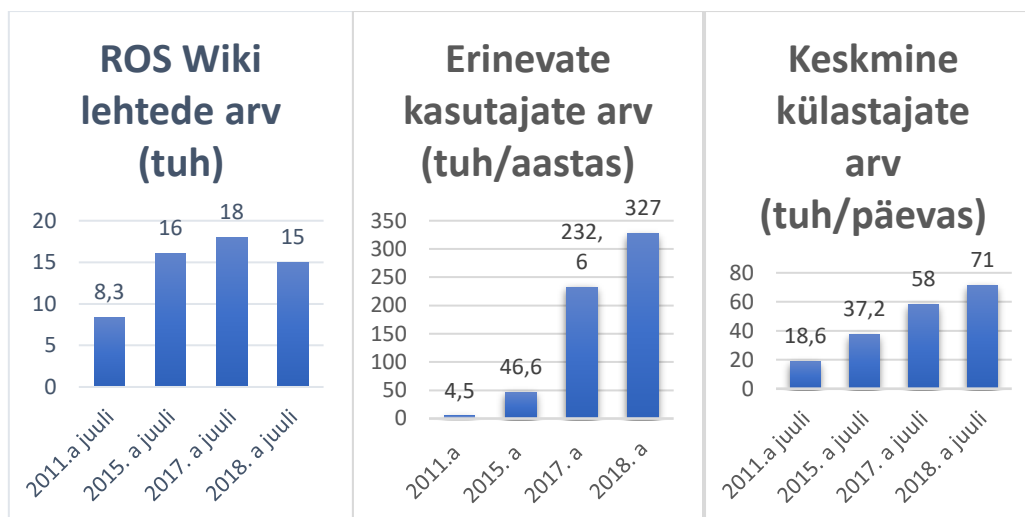
ROS (*Robot Operating System*) on paindlik raamistik, mis koosneb tööriistadest, tekidest ja konventsioonidest, eesmärgiga lihtsustada väga keerukate robotika tarkvarade loomist ja kasutamist erinevatel robotplatvormidel [15]. ROSi eesmärk on kogu robotika arendus standardiseerida, et ei peaks igakord alustama algstruktuuri loomisest, vaid saaks kasutada juba olemasolevat raamistikku, tööriistu ja teke [16]. Trajektoori arvutamine, roboti juhtimine puldiga või kaardistamine drooniga on vaid mõned rakendused, mis on ROSi keskkonnas väga lihtsaks tehtud.

ROS suunab arendajat jagama erineva funktsionaalsusega programmid eraldi ROSi kimpudeks (*ROS Package*) [17]. Selline lähenemine hoiab tarkvara modulaarsena ja võimaldab lihtsa vaevaga proovida näiteks erinevaid kaardistamisalgoritme või lülitada füüsilist robotit kontrolliva draiveri asemel sisse virtuaalne matkedraiver koos simulatsioonikeskkonnaga.

Kuna ROS tarkvara alusraam tugineb kindlatele konventsioonidele, siis iga uue roboti programmeerimine ning uute teekide ja ROS kimpude loomine on sellevõrra lihtsamaks tehtud, samuti on kimbud korduvkasutatavad järgnevates projektides [16]. Lisaks ühtsele tarkvararaamistikule toodetakse ka üha enam riistvara, mis on kooskõlas ROSi konventsioonidega ning tänu sellele ROSiga hästi ühilduvad [16].

ROS on avatud lähtekoodiga projekt, mille tuumiktarkvara on välja antud BSD (*permissive free software license*) litsentsiga. See tähendab, et igaüks võib ROSi kommertslikul eesmärgil kasutada/modifitseerida, kuid ei pea seejuures modifitseeritud varianti avalikuks tegema [18].

ROSil on väga palju erinevaid kasutajaid üle maailma. ROS 2018. a juuli aruande põhjal külastati wiki.ros.org lehekülge rohkem kui 71 tuhat korda päevas ning kokku laeti alla üle 16 miljoni erineva ROSi kimbu ca 300 tuhande erineva kasutaja poolt [19]. 2011. a statistika kohaselt loodi enam kui kaheksa tuhat erinevat ROS wikipedia lehte, mida külastati keskmiselt üle 18 tuhande korra päevas, ja kokku laeti erinevaid kimpe alla veidi enam kui 4500 kasutaja poolt [20]. Kui kõrvutada see aastate 2015, 2017 ja 2018 samade näitajatega, siis on näha, et ROSi areng on iga aastaga märkimisväärselt kasvanud (Joonis 1.3) [19–22].



Joonis 1.3: ROSi kommuuni ja kasutajate aktiivsus [19–22]

Lisaks tavakasutajatele on ROSil aktiivne tööstuse tugi *ROS-Industrial* konsortsiumi näol. *ROS-Industrial* lähtub FTP (*Focused Technical Projects*) fookuseeritud tehniliste projektide põhimõtetest, kus puuduoleva ROS funktsionaalsuse väljaarendamiseks tehtavad kulud kaetakse ühiselt. Konsortsiumi liikmetele on kehtestatud liikmemaksud, mille eest saadakse konsortsiumi sees arendatud tarkvara eelisjärjekorras kasutada [23]. Samuti on ka kõigil liikmetel hääleõigus otsustada selle üle, mida arendama hakatakse. Selline lahendus loob võimaluse arendada väga keerukaid robotika rakendusi, mis muidu oleksid ühele ettevõttele liiga kulukad arendada. Konsortsiumi liikmetel on arendatud lahendustele kuni kahe aastane eksklusiivne kasutamisoigus, misjärel muutuvad need avalikuks [23,24]. 2019. a märtsi seisuga kuulub *ROS-Industrial* konsortsiumisse 68 mainekat ettevõtet ja teaduskeskust, nende hulgas näiteks ABB, 3M, BOSCH, BMW, AIRBUS ja YASKAWA (Joonis 1.4) [25]. Üks hilisemaid liitujaid on Microsoft, kes teavitas ROSi toe pakkumisest Windows 10-le 2018. a ROSCon konverentsil Madridis [26].



Joonis 1.4. ROS-Industrial konsortsiumi liikmed 2019. a märtsi seisuga [25]

1.4 Näiteid haridusrobotikast

Järgnevalt toob autor välja näiteid kahest põhilisest suunast, kus roboteid hariduses kasutatakse. Esimeses on robot ise õpetaja rollis, teises käsitletakse robotit kui õppevahendit.

1.4.1 Robotid kui õpetajad

Elame ajastul, kus info ülekülluse tõttu on traditsiooniline haridussüsteem saavutanud oma piirid ning lisaks õpetajale vajame ka intelligentsete süsteemide tuge [27]. Üha suureneva tehnoloogilise toe vajaduse tingivad hariduses ka demograafilised ja majanduslikud faktorid – koolide rahastused vähenevad, õpilaste hulk klassiruumide kohta kasvab ning samas vajavad õpilased üha enam personaalset lähenemist [28].

Mitmeid aastaid on juba kasutatud virtuaalseid õpiassistente nagu seda on Georgia Tehnoloogiainstituudi poolt välja arendatud Jill Watson [29], kes vastab foorumites igapäevaselt üliõpilaste küsimustele. Seda põhjusel, et pole piisavalt õppejõude, kes suudaks tudengitele vastata, ning tänu AI assistendile saavad korduma kippuvad küsimused kiiremini vastused [29].

Samuti on katsetusi tehtud füüsiliste sotsiaalrobotitega nagu näiteks ettevõtte Aldebaran robot Nao [30], Jaapani android robot SAYA ning RoboThespian [31], kellega viidi läbi ka katsekursusi Jaapani põhikoolis ja Iisraeli teaduskeskuses, kus robotid olid täielikult õpetaja rolli asetatud [32]. Lõuna-Koreas on mitusada lasteaeda, kus robotid aitavad lastel õppida ning assisteerivad lasteaias õpetajaid. Robotite kasutamine on muutunud sama tavapäraseks nagu arvutitegi, lapsed peavad neid isegi oma sõpradeks ja õpetajateks [33].

Väljaande *Science Robotics* artikli „*Social robots for education: A review*“ andmetel on sedalaadi sotsiaalsete robotite (*social robots*) kasutuselevõtmine üha populaarsemaks muutumas [28].

1.4.2 Robotid kui õppevahendid

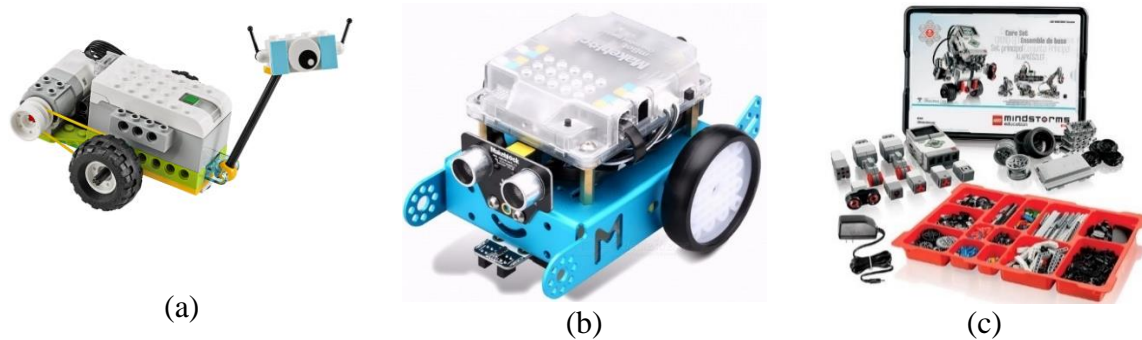
Järgnevalt toob autor näiteid populaarseimatest robotika õppeplatvormidest maailmas ning kirjeldab nende hariduslikku eesmärki, vanuselist sihtrühma, programmeerimismeetodeid ja toetatud operatsioonisüsteeme. Samuti antakse ülevaade baaskomplektide sisust ja nende populaarsusest.

LEGO Education WeDo (Joonis 1.5a) on LEGO poolt toodetud STEM (*Science, Technology, Engineering, Art, Mathematics*) komplekt, mida kasutatakse tihti juba lasteaia astmes nagu selgub Hariduse Infotehnoloogia Sihtasutuse (HITSA) raportist [34,35]. LEGO enda andmetel on mõeldud kasutamiseks alates seitsmenda eluaastast. Põhikomplekt koosneb 280st LEGO klotsist, juhtklotsist, keskmise suurusega mootorist, liikumis- ja kallutusandurist. Lisaks on võimalik osta laiendamiseks lisa klotse, mootoreid ja sensoreid. On mõeldud matemaatilise ja tehnilise mõtlemise arendamiseks. Programmeerimiseks kasutatakse WeDo enda tarkvara, mille sisu luuakse erinevaid plokkide ühendades. Antud tarkvara on võimalik kasutada Windowsis, iOSis, Chromebookis või Androidil [35]. HITSA andmetel on Eestis haridusliku robotika ostmiseks saanud toetust 522 haridusasutust, neist 47% on selle eest soetanud LEGO Education WeDo 2.0 komplekte, mis teeb sellest populaarseima haridusliku platvormi Eestis [34].

Makeblock mBot (Joonis 1.5b) on robotplatvorm, mis on mõeldud kasutamiseks alates 8. eluaastast. mBoti baaskomplekti kuulub kahe rattaga robotplatvorm, millel asub juhtkontroller koos valguse-, infrapuna-, ultraheli- ja joonejärgimise sensoriga. Lisaks on antud platvormile võimalik ühendada sadu erinevaid elektroonikamooduleid, üle 500 Makeblocki enda detaili, lisaks on võimalus platvormi laiendada LEGO klotsidega. Roboti abil õpitakse graafilist programmeerimist, mehaanikat, elektroonikat, mis arendavad loogilist mõtlemist ja disainimise oskust. mBot kasutab Makeblocki arendatud graafilist programmeerimiskeelt. Antud programmeerimiskeskonda toetavad operatsioonisüsteemid on Android, Windows, iOS ja MAC OS [36]. Veebilehtede TomsGuide [37] ja doBot [38] andmetel on mBot maailma üks populaarsemaid robotplatvorme, sama võib välja lugeda ka Amazoni müügistatistikast, kus mBot hoiab kõigi maailma müüdumate haridusrobotika platvormide hulgas kõrget kohta [39].

LEGO MINDSTORMS Education EV3 (Joonis 1.5c) on LEGO poolt toodetud hariduslik komplekt, mis on mõeldud kasutamiseks alates 10. eluaastast. Põhikomplekt koosneb 541st LEGO klotsist, juhtklotsist, servomootorist, güro-, ultraheli-, värvi- ja kahest puuteandurist. Lisaks on võimalik osta laiendamiseks LEGO klotse, mootoreid, sensoreid ja muid huvitavaid laienduspakke. Komplekt on suunatud teaduse, tehnoloogia, matemaatika ja arvutiteaduste õpetamisele. Programmeerimiseks kasutatakse EV3 graafilise programmeerimise keskkonda. Antud tarkvara on võimalik kasutada Windowsis, iOSis, Chromebookis või Androidil [40].

Aastatel 2014-2018 on EV3 Lego Mindstorms komplektid HITSA kaudu soetanud endale 214 haridusasutust, mis moodustab 41% kogu toetuse saanutest [34]. Erinevate Internetiallikate väitel on EV3 LEGO Mindstorms populaarsuselt maailmas 8. kohal [37,38]. Selle põhjal saab väita, et antud komplekt on üks populaarsemaid nii Eestis kui ka maailmas.



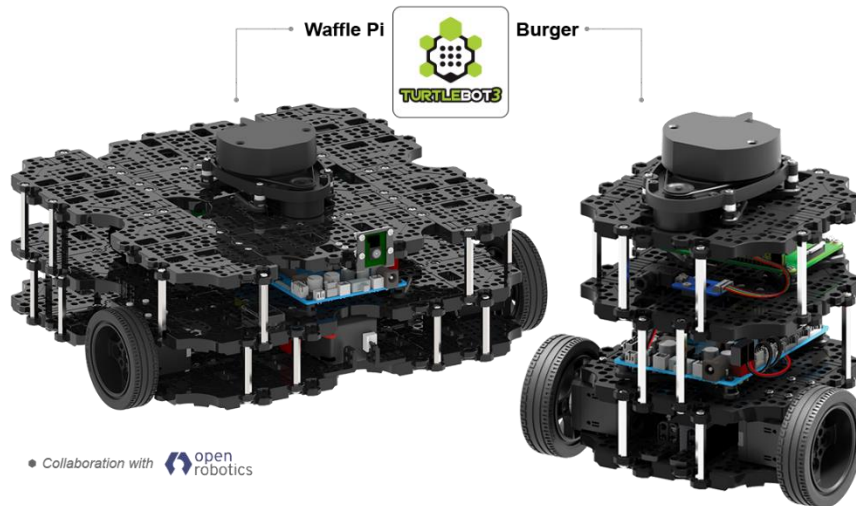
Joonis 1.5: Hariduslikud robotid, (a) WeDo [35], (b) Makeblock mbot [41], (c) EV3 Lego Mindstorms [40].

Ülaltoodud platvormid on väga head STEM hariduse arendajad, kuid otsene rakendus tööstuses neil puudub, sest nendega ei ole võimalik õppida programmeerima tööstustele ja teaduskeskustele vajalikus keskkonnas. Seega on vaja üleminekuplatvorme, mis oleks madalama tasemega haridusrobotika jätkuks ja haakuks tööturu vajadustega. Lähtuvalt ptk 1.2 võib väita, et ROSi populaarsus on kasvav ning ka kõrgtasemelised hariduslikud platvormid peaksid seda toetama, et maksimeerida ettevalmistust tööturu vajadustele.

Juba hetkeseisuga on maailmas väga palju ratasplatvorme, mis on ROS kommuuni poolt ametlikult aktsepteeritud [42]. Neist üks populaarseimad haridusele ja treeningutele suunatud platvorm on Turtlebot.

Turtlebot 3 (joonis 1.6) on ROSil põhinev mobiilne robot, mis on mõeldud kasutamiseks haridus- ja teadustöös, hobirobootikutele ja toodete prototüüpimiseks. Turtlebot on praeguseks saadaval kahes seadistuses, Burger, Waffle Pi ning suurema arvutusvõimekuse ja 3D kaameraga Waffle-i tootmine on käesolevaks hetkeks lõpetatud. Pardaarvutina on mõlemal versioonil kasutusel Raspberry Pi 3 [43], juhtkontrollerina OpenCR 1.0 [44], sensoritest 360 LiDAR [45] ning güro- ja kiirendusandur. Liikumiseks kasutavad mõlemad mudelid kahte Dynamixel mootorit, Waffle Pi-l XM430 [46] ja Burger versioonil XL430 [47].

Põhisuund on õpetada autonoomselt liikuvate platvormide tehnoloogiaid nagu kaardistamine, navigeerimine ja takistuste vältimine. Võimaldab teha 2D kaardistamist, kuid 3D kaardistamise jaoks on pardaarvutina kasutusel oleva Raspberry Pi võimekus limiteeritud. Seda näitab ka katse, kus kasutati roboti konfiguratsioonis Raspberry Pi 3-e, 2D LiDAR-it, RGB-D kaamerat, ning 90% Raspberry ressursi kasutamisel saadi kaardistamise kiiruseks vaid 0,3 Hz [48].



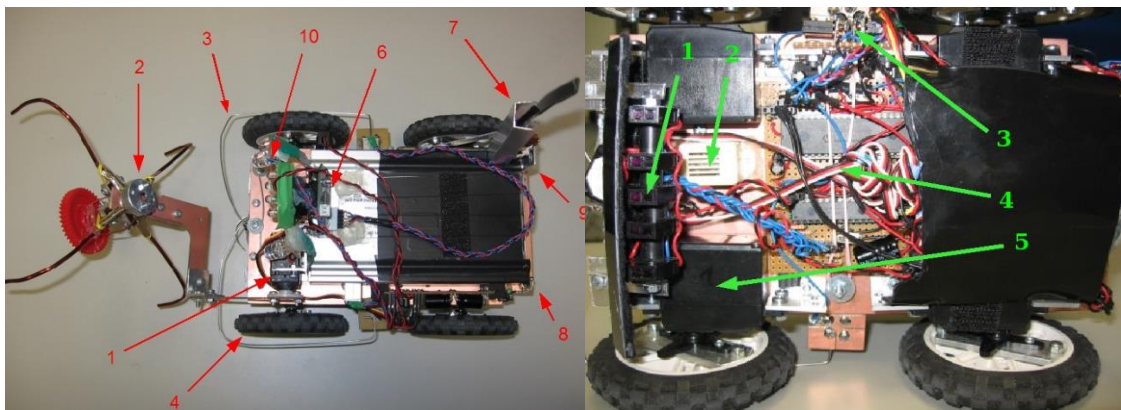
Joonis 1.6: Turtlebot 3 [49]

2 TÜ ajalugu Robotexist Robotondini

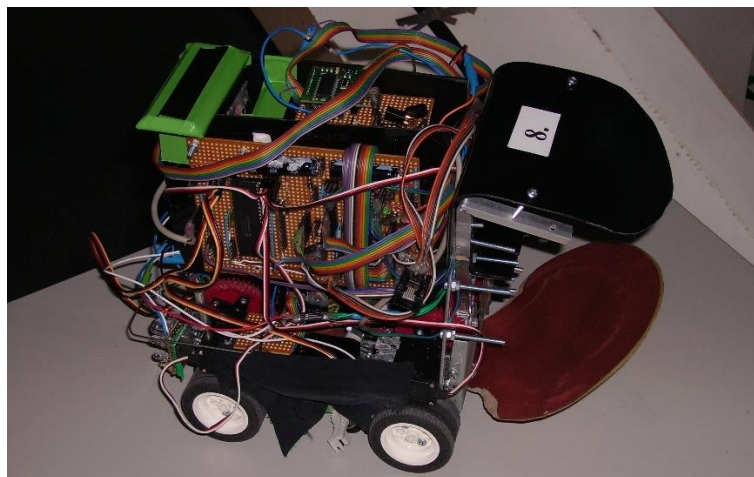
2.1 Tartu Ülikooli Robotexi traditsioonid

Robotex on rahvusvaheline robotivõistlus, mis toimub igal aastal alates aastast 2001 ja leiab aset enamasti novembri lõpus või detsembri alguses. Võistluse algupärasteks korraldajateks on olnud Tallinna Tehnikaülikool, Tartu Ülikool ja IT kolledž [50,51].

Esimesed dokumenteeritud andmed Tartu Ülikooli osalemisest võistlejatena pärinevad aastast 2005, kui TÜd esindasid viis võistkonda, mille seast võistkonnad KOHUKE (Joonis 2.1) ja OOL SÜSTEMS JA KOMPANII (Joonis 2.2) saavutasid vastavalt teise ja neljanda koha [52].



Joonis 2.1: Võistkond KOHUKE võistlusrobot 2005. a [53]



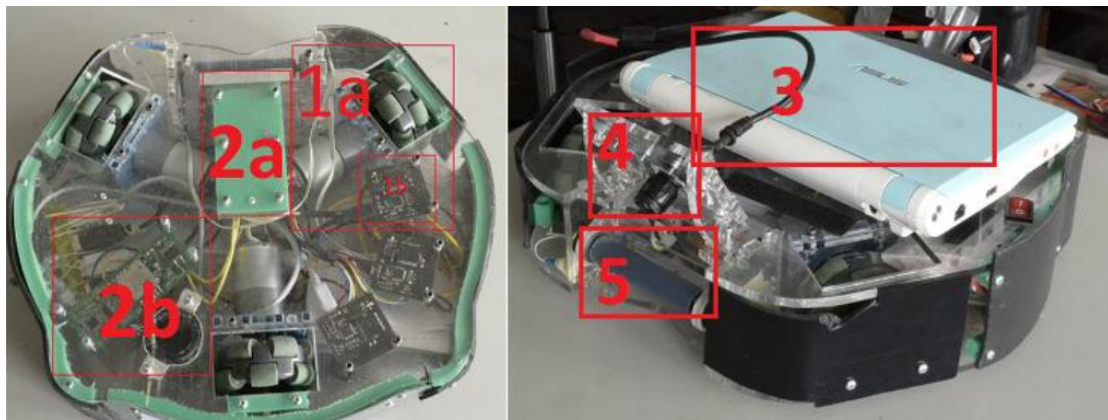
Joonis 2.2: Võistkond OOL SÜSTEMS JA KOMPANII võistlusrobot 2005.a [54]

Robotexi alguspäevil kuulutati igal suvel välja uus võistlusülesanne, mis oli oma olemuselt tihti väga erinev eelnevast. Sedasi välditi võistlustel eelmiste aastate robotite kasutamist [51]. Võisteldi näiteks lamba karjatamises, takistusraja läbimises, objektide ümberpööramiseks, labürindi läbimises, võrkpallis, karu päästmises, köiel ronimises ja jalgpallis [55].

Aastal 2009 viidi sisse põhimõtteline muudatus, mis tekitas esmakordselt Robotexi ajaloos võimaluse sama platvormi või selle edasiarendust ka järgnevatel aastatel kasutada. Nimelt alates sellest aastast hakati korraldama robotitevahelist jalgpalli, mille reeglites lähtuti „RoboCup Middle Size League“ võistlusformaadist. Võistluse eesmärgiks oli väljakul asetsevad 10 palli väravasse lüüa. Võidab robot, mis toimetab suurema arvu palle vastase väravasse [51].

TÜs valmistatakse Robotexiks õppeaine (Robootika praktikum LOTI.05.023) raames. Tegemist on sügissemestri ainega jättes osalejatele *ca* kaks kuud, et jõuda ideekavandist valmislahenduseni. Mitmed võistkonnad ei suutnud Robotexi ajaks valmislahendusteni jõuda ja tihti võisteldi poolikute robotitega [51].

Probleemi lahendamiseks alustati 2011. a erinevate valmismoodulite väljatöötamist. Moodulite kasutamine kiirendas ehitamise aega, suurendas töökindlust ning andis võimaluse erinevatel võistkondadel teha koostööd, sest valdavalt kasutati identseid alusmooduleid [51]. Töötati välja liikumismoodul, keremoodul, triblajamoodul ja löögimoodul, millest viimasega tegeles süvitsi oma bakalaureusetöö raames Kalle-Gustav Kruus [51]. Joonisel Joonis 2.3 näeme tüüpilist 2013. a Robotexi jalgpalliroboti standardlahendust.



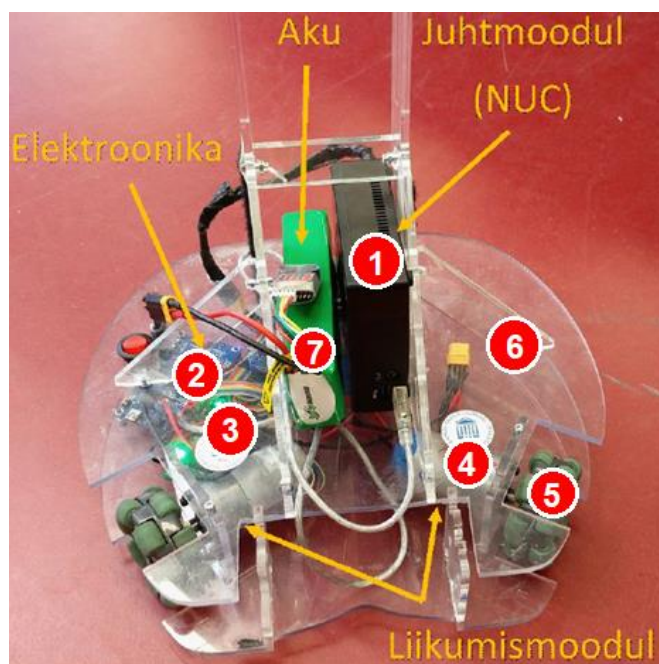
Joonis 2.3: TÜ meeskonna robot Kübaratrikk. Tüüpiline standardlahenduse näide aastal 2013; 1a ja 1b – liikumismoodul, 2a ja 2b – löögimoodul, 3 – juhtarvuti, 4 – kaameramoodul, 5 – triplajamoodul [51]

Eelnevate aastate Robotexi platvormide lahendused on leitavad TÜ digilabori ametlikult kodulehelt [50].

2.2 ROSi tugi Robotexi robotplatvormile

Aastaks 2016 oli jalgpalli võistlusroboti riistvara lahend jõudnud sedavõrd stabiilsesse järku, et selles nähti ka potentsiaali haridus- ja teadusvaldkonnas. Kui eelnevalt keskenduti riistvaralahendusele, siis tarkvara standardiseeritud tugi sisuliselt puudus. Esimene samm tarkvara standardiseerimise suunas oli Raid Vellerindi bakalaureusetöö [56], mille raames valmis esmane ROS-tarkvara tugi antud robotile.

Arendati välja ROS-draiveri kimp *robotont_driver*, mis koordineerib robotplatvormi riistvara ja ROSi navigatsiooniteegi vahelist suhtlust. Draiveri testimiseks kasutati võistkonna „Frankenstein“ 2016. a robotit (Joonis 2.4), millelt eemaldati kaamera-, triblaja- ja löögimoodul. Loodud ROS-draiveri funktsionaalsust demonstreeriti roboti juhtimisel nii klaviatuuri kui ka nutitelefoni. Sellest arendusest alates nimetati projekti arenduse ja dokumentatsiooni parema halduse huvides koodnimega Robotont [56].



Joonis 2.4: Liikumisvõimekusega robotplatvorm: 1 – pardaarvuti; 2 – juhtkontroller; 3 – mootori kontrollerid; 4 – koodriga alalisvoolumootor; 5 – omniratas; 6 – polükarbonadist kere; 7 – aku; [56]

Esialgse Robotondi projekti käigus valmis lisaks draiverile ka esimene versioon juhendist roboti juhtimiseks nutitelefoni [56].

3 Robotont generatsioon 1

3.1 Eesmärk

Järgnevalt oli plaan töötada välja ja toota Robotexi robotil baseeruvad kuus ROSi toega mobiilset robotit. Lisaks luua eestikeelsed juhendmaterjalid, mille abil töötube läbi viia.

Põhieesmärk oli anda Eesti gümnasistidele reaalne kogemus ROSi vahendite kasutamises robotikas.

3.2 Nõuded

3.2.1 Nõuded projektile

1. Projekti käigus valmib vähemalt 6 mobiilset robotplatvormi
2. Välja töötada töötoad koos eestikeelsete juhendmaterjalidega
3. Platvormid koos juhendmaterjalidega on valmis detsembriks 2017. a
4. Projekti piloteerimine toimub Robotexil 2017

3.2.2 Nõuded robotplatvormile

1. Valmistada MVP (*minimum viable product*) arvestades järgmisi põhimõtteid:
 - Kasutada võimalikult palju olemasolevat lahendust
 - Lisada minimaalselt uusi komponente
2. On varustatud sobiva riistvaraga 2- ja 3-mõõtmeliseks kaardistamiseks
3. On omniratastega tasapinnal liikuv robotplatvorm
4. On varustatud ROSi tarkvara käitava pardaarvutiga
5. Pardaarvuti on piisavalt võimekas keskkonna kaardistamiseks ja navigeerimiseks

3.2.3 Nõuded juhenditele

1. Juhendid on eestikeelsed
2. Juhendmaterjalide põhjal peavad õppurid saama robotite peal tutvuda kaasaegsete robotika probleemidega nagu robotite juhtimine, keskkonna kaardistamine, rajaplaneerimine, kokkupõrgete vältimine ja inimeste tuvastamine

3.2.4 Nõuded töötubadele

1. Tutvustavad ROSi
2. On eestikeelsed
3. On digitaalsel kujul kättesaadavad
4. Annavad praktilise kogemuse roboti kasutamises

3.3 Disain ja lahendus

3.3.1 Robotont generatsioon 1 kasutamine

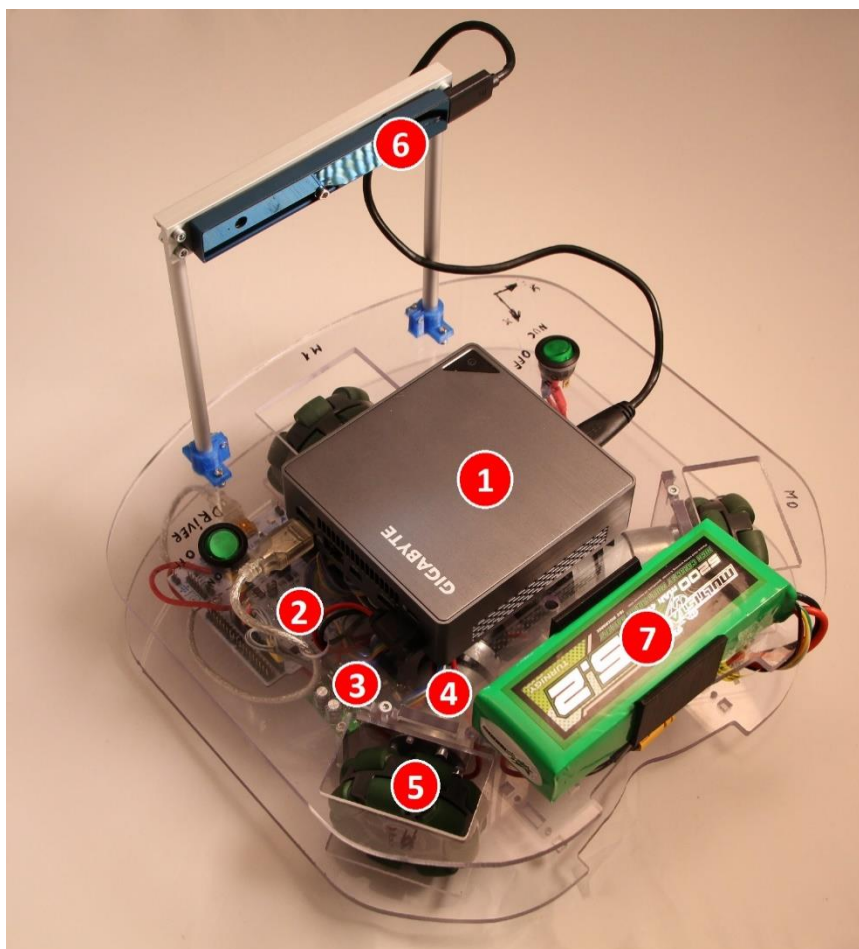
Robotondi kasutamiseks õpitoas on igal õppuril sülearvuti, mis on ühendatud robotondi pardaarvutiga samasse WiFi võrku. See võimaldab sülearvuti kasutajal ühenduda robotiga ja käitada seal programme kasutades nii graafilist VNC kaugtöölauda kui ka käsureapõhiselt SSH-tunnelit (Joonis 3.1). Iga robot on seadistatud omaette WiFi pääsupunktina.



Joonis 3.1: Robotont gen 1 kasutamist seletav skeem

3.3.2 Üldstruktuur

Joonisel 3.2 on kujutatud Robotont gen 1 valmislahendus ning selle peamised komponendid. Vastavalt ptk 3.1 toodud tingimustele kasutati koostamisel mitmeid Robotexi moodullahendusi ning eemaldati mittevajalikud komponendid. Täpsema ülevaate tehtud muudatuste ja kasutatud komponentide kohta annab Tabel 3.1. ✓ - tähendab detaili kasutamist ja X – detaili puudumist.



Joonis 3.2: Robotont gen 1 ja selle põhikomponendid: 1 – pardaarvuti; 2 – juhtkontroller; 3 – mootori kontrolleri; 4 – koodriga alalisvoolumootor; 5 – omniratas; 6 - Intel Realsense Sügavuskaamera; 7 – aku

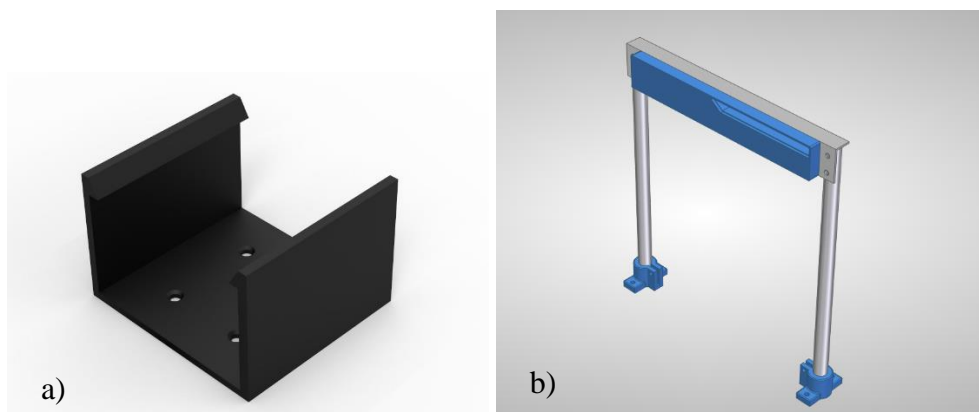
Tabel 3.1: Robotexi roboti ja Robotont gen 1 komponentide võrdlus

	Robotexi robot	Robotont gen 1
Keremoodul		
Alumine plaat (polükarbonaat)	✓	✓
Ülemine plaat (polükarbonaat)	✓	✓
Rattamoodul		
Mootori otsaplaat (polükarbonaat)	✓	✓
Mootori tüüp	Pololu 37Dx68L [57]	
Omniratas	Vex Robotics double roller 2.75“ [58]	
Pallihaldamise moodul		
Coilgun	✓	X
Triblaja	✓	X
Elektroonika moodul		
Pardaarvuti	Intel NUC	Gygabyte Brix
Juhtkontroller	TÜ platvorm	NUCLEO-L476RG
Mootorite kontrolleriid	MC3886 põhine	
Kaamera	Logitech C920	Intel RealSense R200

3.3.3 Koostelahendus

Alusvanker ehk keremoodul vastab suures osas Robotexi robotplatvormile (ptk 2), millele tehti järgnevad muudatused:

1. Kasutusele ei võetud pallihaldamise moodulit (löögi- ja triblajamoodul).
2. Lisati kinnituslahendus LiPo (*lithium polymer*) aku jaoks (joonis 3.3a).
3. Lisati kinnituslahendus Intel Realsense R200 kaamera jaoks (joonis 3.3b) [59].



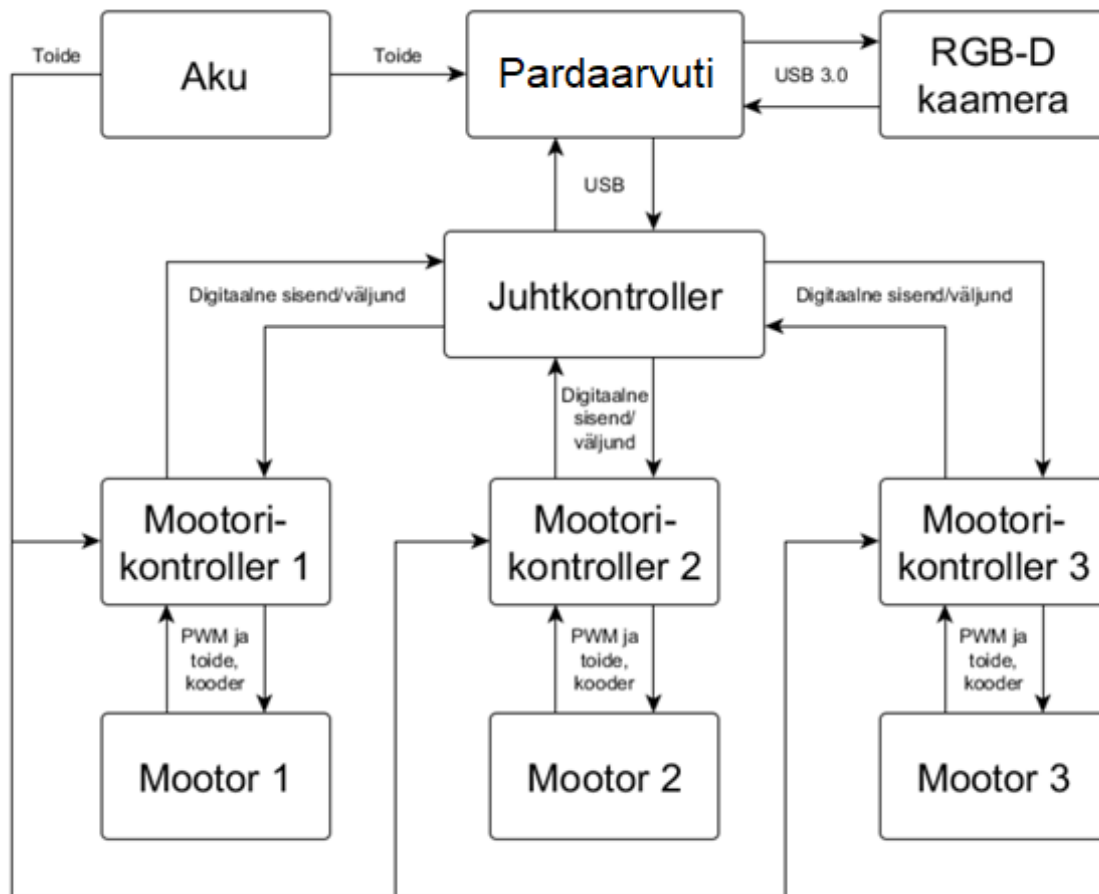
Joonis 3.3: Kinnituslahendused, (a) aku jaoks, (b) kaamera jaoks.

Detailne komponentide nimekiri asub Lisa 2 Robotont generatsioon 1 BOM.

Joonised detailidest ja koostejoonised asuvad Lisa 2 Robotont generatsioon 1 joonised.

3.3.4 Elektroonika

Kogu Robotont gen 1 elektroonikalahendust kirjeldab Joonis 3.4. Pardaarvuti edastab juhtkontrollerile mootorite kiirused ning võtab sellelt vastu mootorite koodrite väärtused. Juhtkontroller on omakorda ühendatud mootorite kontrolleritega, millele ühenduvad Pololu mootorid. Mootorite kontrollerite ülesanne on juhtkontrolleri kiirused ning akust tulev vool edastada mootoritele ning edastada mootoritelt tulnud koodrite väärtused juhtkontrollerile. Juhtkontroller on juhtarvutiga ühendatud mini-USB ja kaamera USB-Micro-B kaabliga [60].



Joonis 3.4: Roboton gen 1 elektronikaühendusi kirjeldav skeem [60]

Võrreldes Robotexi platvormiga oli suurimateks muudatusteks juhtkontrolleri vahetus. Kui varasemalt kasutati TÜ Robotiklubi poolt arendatud juhtkontrollerit [61], siis Robotondil võeti kasutusele elektroonikakauplustest tellitav NUCLEO-L476RG arendusplaat [62]. Selline otsus võimaldab tootmist lihtsustada, aega kokku hoida ja jätab tulevikus võimaluse lisaseadmete jaoks.

Teine muudatus oli Logitech C920 asendamine sügavuskaameraga Intel RealSense R200 [59]. Robotondi gen 1 nõuetest lähtuvalt oli vajadus keskkonna 2D ja 3D kaardistamise järele, mille saavutamiseks on tarvis kaamerat, mis väljastab ka punktipilve. Intel RealSense R200 on sügavuskaamera, mis lisaks kvaliteetsele 2-mõõtmelisele pildile edastab robotile 3-mõõtmelise punktipilve vastavalt füüsilise maailma objektidele. Sügavusinfo abil on võimalik suurema täpsusega robotit lokaliseerida, leida kauguseid erinevatest objektidest ja vältida kokkupõrkeid. Kuna sügavusinfo arvutused tehakse kaamera riistvaras, siis jääb pardaarvutil selle võrra rohkem ressursi muudeks tegevusteks [63].

3.3.5 Tarkvara

Projekti käigus testiti ja võeti kasutusele Vellerindi poolt arendatud ROSi draiver, mille edasise arendusega tegeles oma lõputöös Martin Maidla [60].

Konfigureeriti ja paigaldati sülearvutitele ning robotplatvormidele töötubade läbiviimiseks tarkvara ROS Kinetic Kame [64], ning järgnevad lisatarkvarad:

ROS kimbud

robotont_driver – spetsiaalne draiver Robotondi jaoks, mis korraldab suhtlust juhtkontrolleri ja pardaarvuti vahel [56]

ros-kinetic-serial – ROS kimp jadaliidese kaudu suhtlemiseks Robotondi pardaarvuti ja juhtkontrolleri vahel [65]

ros-kinetic-joy – tarkvara, mis tõlgendab mängukontrolleritest tuleneva info ROSi standardsõnumiteks [66]

ros-r200-realsense-camera – Intel Realsense R200 spetsiifiline kaamera draiver [67]

ros-kinetic-hector-slam – programm, mida kasutatakse 2D kaardistamiseks [68]

ros-kinetic-rtabmap-ros – programm, mida kasutatakse 3D kaardistamiseks [69].

ros-kinetic-joystick-drivers – universaalset draiver, mis toetab Linuxis erinevaid mängukontrollereid [70]

teleop-twist-keyboard – ROSi kimp, mis loeb käsurealt klahvivajutusi ja teisendab need ümber sõnumiteks roboti kiirustega. [71]

Lisatarkvara Linuxi tarkvarahoidlast:

openSSH-server – tarkvara, mis on vajalik SSH serveri loomiseks, võimaldab läbi SSH tunneli robotisse ühenduda ja seda kaughallata [72]

ntptime – programm millega sünkroniseeritakse samas võrgus olevad arvutid, sest isegi 1 ms ajavahet võib põhjustada näiteks kaardi või kaamerapildi mitte kuvamise [73]

DroidTick – server arvutis või robotis, mis võimaldab nutiseadet kasutada mängukontrollerina, eeldusel, et vastav rakendus on paigaldatud ka nutiseadmesse [74]

3.3.6 Juhendmaterjalid

Töötubade läbiviimiseks loodi neli juhendit. Selles peatükis sõnastatakse iga juhendi konkreetsed eesmärgid ja õpiväljundid. Ühisosana õpitakse kõikides töötubades muuhulgas kasutama Linuxit, Linuxi käsurida ja käivitama programme erinevatest ROSi kimpudest. Lisaks omandab õppur juhendeid järgides baasteadmised SSH-põhisest roboti kaughaldusest.

1. Roboti juhtimine arvutist – Antud töötoa eesmärk on anda õppurile praktiline kogemus ROS keskkonna kasutamisel, õpetades klaviatuuriga kaugteel roboti juhtimist kasutades *teleop_twist_keyboard* ROS kimpu.

a) Töötoa läbinud õppur:

- i) Saab aru omniliikuva platvormi liikumise loogikast
- ii) Oskab juhendi põhjal käivitada ROS kimpu *teleop_twist_keyboard* ning Robotondile spetsiifilist draiverit *robotont_driver*
- iii) Saab aru *teleop_twist_keyboard* juhtimise loogikast ning oskab seda Robotondi juhtimiseks kasutada

2. Roboti juhtimine nutitelefoni – Antud töötoa eesmärk on demonstreerida ROSi võimekust, näidates, et töötoa robotit Robotont on võimalik juhtida ka isikliku nutitelefoni

a) Töötoa läbinud õppur:

- i) Oskab juhendi põhjal käivitada ROS kimpu *driver_teleop_joy*, mis sisaldab endas mängukontrolleri füüsilise ja matkedraiveri ning roboti draiveri *robotont_driver* käivitamist.
- ii) Oskab käivitada ja kasutada programmi DroidTick, mille abil on Robotonti võimalik nutitelefoni
- iii) Mõistab Robotondi puldiga juhtimise loogikat ja oskab kasutada puldi funktsionaalsust

3. Kaamerapildi ja punktipilve kuvamine – Antud töötoa eesmärk on näidata ja kõrvutada meile nähtav kaamera pilt robotile nähtavad punktipilvega, mis edastab robotile kasulikku informatsiooni tema asukoha kohta ja selle kohta, kui kaugel temast erinevad objektid asuvad.

a) Töötoa läbinud õppur:

- i) Oskab juhendi põhjal käivitada ROS kimpu R200 kaamera jaoks, *roslaunch* kiirkäitusfailide abil.

- ii) Teeb tutvust ROSi visualiseerimiskeskonna Rviz-iga, milles kuvatakse kaamerast tulenevat infot nii punktipilve kui 2D pildina.
- iii) Saab aru punktipilve olemusest ja on võimeline selle järgi navigeerima.
- iv) Mõistab, et Roboti jaoks on nähtav informatsioon midagi muud, kui inimese jaoks

4. Robotiga ümbritseva ruumi kaardistamine – Antud töötoa eesmärk on eelnevas töötoas saadud teadmisi rakendada kasulikult ehk koostada 3D kaamerast saadud informatsiooni põhjal 2D kaart, mille järgi robot oleks võimeline navigeerima.

a) Töötoa läbinud õppur:

- i) Saab aru kaameraga kaardistamise loogikast
- ii) Oskab käivitada 2D kaardistamiseks mõeldud ROSi kimpu `hector_slam` ja 3D kaardistamiseks mõeldud RTAB-Map programmi
- iii) Oskab robotiga navigeerida 2D kaardi järgi

Juhendid on leitavad töö **Lisast 1**.

Juhendmaterjale testiti robotivõistlusel Robotex 2017 ja Tartu Raatuse Kooli robotikaringis. Kokku viidi läbi viis töötuba, kus osalejad said omal käel tegeleda kaasaegsete robotitega kasutades ROS platvormi vahendeid nii sülearvutis kui ka robotil.

3.3.7 Tulemused ja järeldused

Robotont gen 1 töö tulemusena valmis kuus töökorras robotit (Joonis 3.5) koos juhendmaterjalidega töötubade läbiviimiseks.

Juhendite eesmärgid said täidetud. Õppurid tutvusid kaasaegsete robotika probleemide ja nende lahendamise loogikaga. Uudne tehnoloogia oli õppuritele väga huvipakkuv.



Joonis 3.5: Valminud robotid

Töötubade läbiviimisel ja robotplatvormi testimisel tulid siiski välja ka mõned puudused:

- Rattad tulid mitmel korral mootori võlli küljest lahti ning nende taaskinnitamine oli keeruline;
- manussüsteemide töös esines tõrkeid;
- aku on paigutatud roboti esiossa, mistõttu:
 - võib osutuda ohtlikuks roboti kokkupõrkamisel teiste robotite või muude objektidega;
 - massi ebaühtlane jaotus rataste vahel suurendas ebatäpsusi odomeetrias.

4 Robotont generatsioon 2

4.1 Eesmärk

Järgnevalt oli eesmärk töötada välja stabiilne versioon Robotondist ning esmase partiina toota vähemalt 15 robotit, et oleks võimalik läbi viia ülikooli kursuseid. Samuti seati eesmärgiks üles seada struktureeritud dokumendihaldus edasiste arenduste tarvis.

4.2 Nõuded

Robotont gen 2 nõuete sõnastamisel lähtuti gen 1 testimisel esinenud puudustest, mis tuli eemaldada, ja tähelepanekutest, mida tuli järgmise generatsiooni puhul muuta. Gen 2 peab järgima kõiki gen 1 robotile esitatud nõudeid (ptk 3.2) ja lisaks vastama järgnevatele tingimustele:

1. Keredetailid peavad olema tööstuslikult toodetavad
2. Rattad peavad olema vahetatavad roboti teisi detaile eemaldamata
3. Peab olema ohu korral kiiresti väljalülitatav (*E-stop*)
4. Ei tohi kaaluda üle 3 kg
5. Robot kasutab toiteallikana liitiumpolümeer akut, mis võimaldab robotit kasutada aktiivselt ringi sõites vähemalt 60 minutit
6. ROSi tugi – driver, näiteprogrammid ja juhendid
7. Platvorm võimaldab modulaarset laiendamist
 - a. Võimalus lisada uusi sensoreid ja seadmeid roboti külge nii elektriliselt kui ka mehaaniliselt
8. Robot peab olema varustatud tehnilise dokumentatsiooniga

4.3 Disain ja lahendus

4.3.1 Robotont generatsioon 2 kasutamine

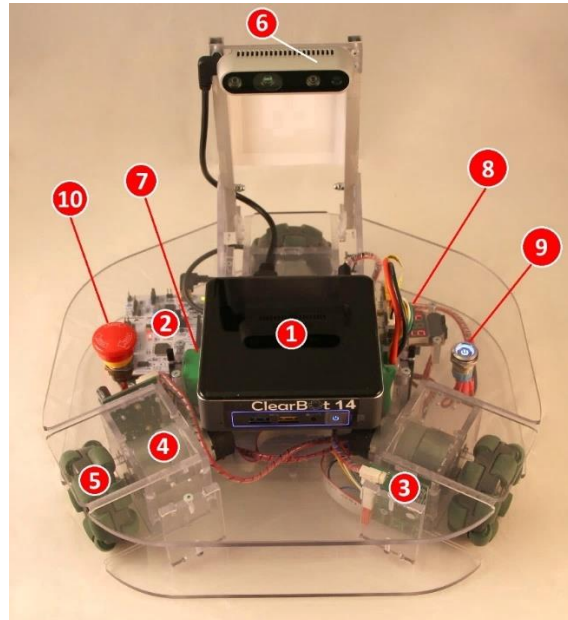
Nagu ka gen 1 puhul, kasutatakse robotite omavaheliseks ühendamiseks WiFi võrku. Kui varasemalt oli iga robot seadistatud eraldi pääsupunktiks, siis nüüd ühenduvad kõik robotid automaatselt ühtsesse WiFi võrku, mis nõuab küll eraldi ruuteri olemasolu, kuid võimaldab roboteid ühendada ka ühtsesse ROS keskkonda. Samuti on sellise topoloogia korral lihtne kõiki roboteid hallata.



Joonis 4.1: Robotontide ühenduvus arvutitega

4.3.2 Üldstruktuur

Joonisel Joonis 4.2 on kujutatud Robotont gen 2 valmislahendus ning selle peamised komponendid.



Joonis 4.2: Robotont gen 2 ja selle põhikomponendid: 1 – pardaarvuti; 2 – juhtkontroller; 3 – mootori juhtplaat; 4 – koodriga alalisvoolumootor; 5 – omniratas; 6 – Intel Realsense Sügavuskaamera; 7 – aku; 8 – toitelahenduse plaat; 9 – toitenupp; 10 – E-Stop

Tabel 4.1: Robotont gen 1 ja gen 2 võrdlus

	Robotont gen 1	Robotont gen 2
Keremoodul		Kere disain muutus Robotont gen 2 puhul täielikult.
Rattamoodul		
Mootori otsaplaat (polükarbonaat)	✓	Otsaplaadi disain muutus ning lisandus veel komponente kogu rattamooduli disainile
Mootori tüüp	Pololu 37Dx68L [59]	
Omniratas	Vex Robotics double roller 2.75“ [60]	
Elektroonika moodul		
Pardaarvuti	Gigabyte BRIX GB-BSi5-6200	Intel NUC7i5BNK
Juhtkontroller	Intel Realsense R200	Intel Realsense D435
Mootorite kontrollerid	NUCLEO-L476RG	
Kaamera	MC33886 põhine	MC33887 põhine
Toitelahenduse elektroonika	X	✓

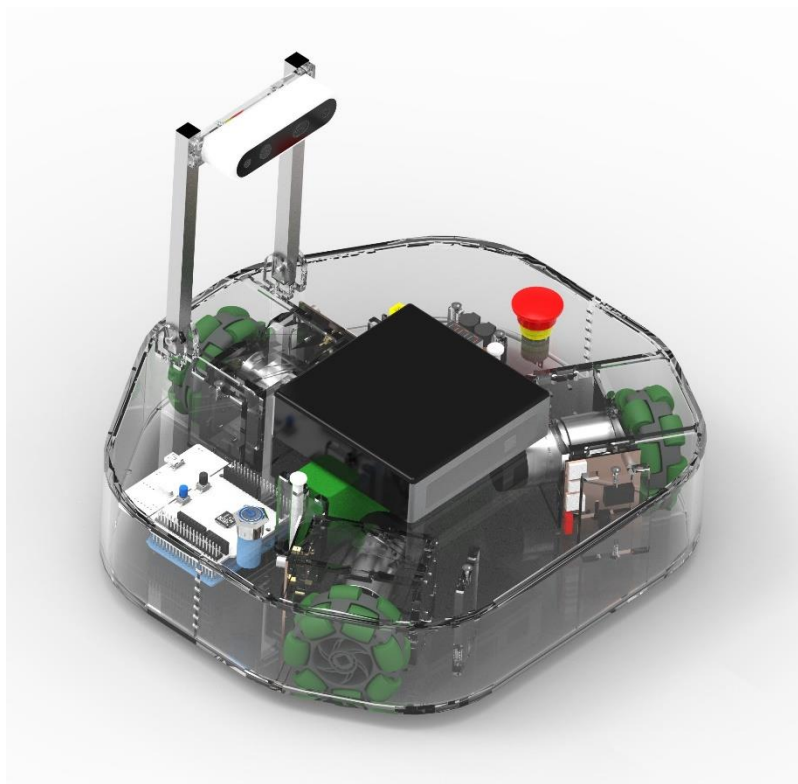
Detailne komponentide nimekiri asub Lisa 2 Robotont generatsioon 2 BOM.

Joonised detailidest ja koostejoonised asuvad Lisa 2 Robotont generatsioon 2 joonised.

4.3.3 Koostelahendus

Robotont gen 2 puhul kasutatakse samu omnirattaid, mootoreid, juhtkontrollerit ja akut, mis Robotont gen 1 puhul ning samuti on ka kere põhimaterjal sama, polükarbonaat, täpsemalt loetletud komponentidest ptk 3.3. Antud komponendid ja materjalid on läbi Robotexi ajaloo ja Robotont gen 1 peal tõestanud oma vastupidavust ja kvaliteeti.

Roboti disainimiseks kasutati Solid Edge educational tarkvara [75], mille abil koostati robotist täielik 3D mudel (Joonis 4.3). Mudel oli aluseks kogu roboti tootmisele.

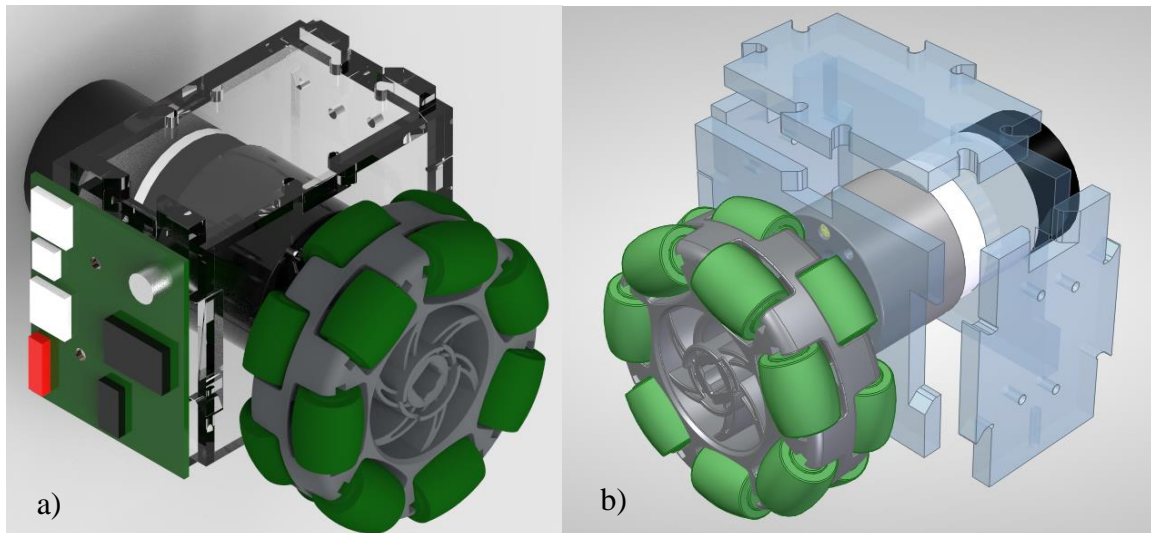


Joonis 4.3: Robotont gen 2 3D mudel

Uue mehaanika disaini juures on rõhutatud modulaarsusele. See tähendab, et robot on lihtsasti moodulitest koostatav ning ka hoolduse huvides lihtsasti demonteeritav. Kogu roboti modulaarsest disainist lähemalt järgnevatel lõikudel.

Robotont gen 2 rattamoodul on disainitud roboti küljest lihtsasti eemaldatavana ja demonteeritavana. See võimaldab vajadusel pääseda operatiivselt ligi nii mootorile, koodrile kui ka mooduli küljele kinnitatud juhtelektroonika plaadile. Ratast on võimalik eemaldada ja kinnitada moodulit roboti küljest eemaldamata. Kõik kolm rattamoodulit on universaalsed ja omavahel vahetatavad. Lisaks puuriti mootori võlli faas, mis tagab tugeva ühenduse ratta kinnituskruvi ja mootori võlli vahel.

Joonisel 4.4a näeme gen 2 rattamooduli disaini monteeritud kujul. Mooduli disainimisel peeti silmas, et kruve kasutada minimaalset. Sellepärast võeti mooduli disainimisele eeskujuks kalasaba tapid, mida on väga palju kasutatud ka näiteks palkmaja ehituses [76]. Antud ühendusviis on kuvatud mooduli pooleldi avatud vaates joonisel 4.4b.



Joonis 4.4: Robotont gen 2 rattamoodul, (a) monteeritud kujul, (b) avatud vaates

Ka aku jaoks loodi mehhanism, mis võimaldaks seda lihtsasti kinnitada, eemaldada ja vahetada. Aku paiknemise juures peeti silmas, et roboti mass peaks olema võimalikult ühtlaselt rataste vahel jaotunud. Sellest lähtuvalt on gen 2 disainis aku asukoht viidud võimalikult madalale ja roboti keskele.

4.3.4 Tootmine

Keredetailide tootmiseks kasutati enamasti CNC-freesi. Seda põhjusel, et polükarbonaati ei ole võimalik laseriga lõigata. Vastasel juhul oleks olnud võimalik vähemalt detailide kontuurid laseriga lõigata, sest laserlõikus on ligikaudu kaks korda odavam, kui freesimine. Kaablite koostamisel kasutati pressitavaid ühendusi, mis koostati isoleeritud pistikutesse. Lisaks kasutati hulganisti lukksepa tootmistehnoloogiaid nagu näiteks puurimine, keermestamine, faasimine. Kõige viimaseks tootmisoperatsiooniks oli koostamine, kus kõik toodetud detailid kokku pandi.

4.3.5 Elektroonika

Tabelist 4.1 näeme, et võrreldes gen 2te Robotont gen 1ga püsis muutumatuna vaid juhtkontroller. Pardaarvuti vahetati välja uuema ja võimsama vastu, et oleks võimalus võimekamaid algoritme käitada. Samuti vahetati välja Intel Realsense R200 uuema D435-e vastu, sest R200-t enam ei toodeta ning D435 oli sobivaks alternatiiviks.

Juurde lisati toitelahenduse elektroonika plaat millele on oluliselt lihtsam pistikutega kõiki detaile ühendada kui varasema juhe-juhtme külge lahenduse puhul. See tekitas ka võimaluse lisada suurte toitelülitite asemele kompaktsem lahendus, mis kogu toiteahelat relee abil lülitaks.

Uue roboti jaoks disainiti uus mootorikontroller, mis kasutab MC33887 H-silda. Võrreldes MC33886 kiibiga on MC33887-l lisatud voolu mõõtmise funktsionaalsus.

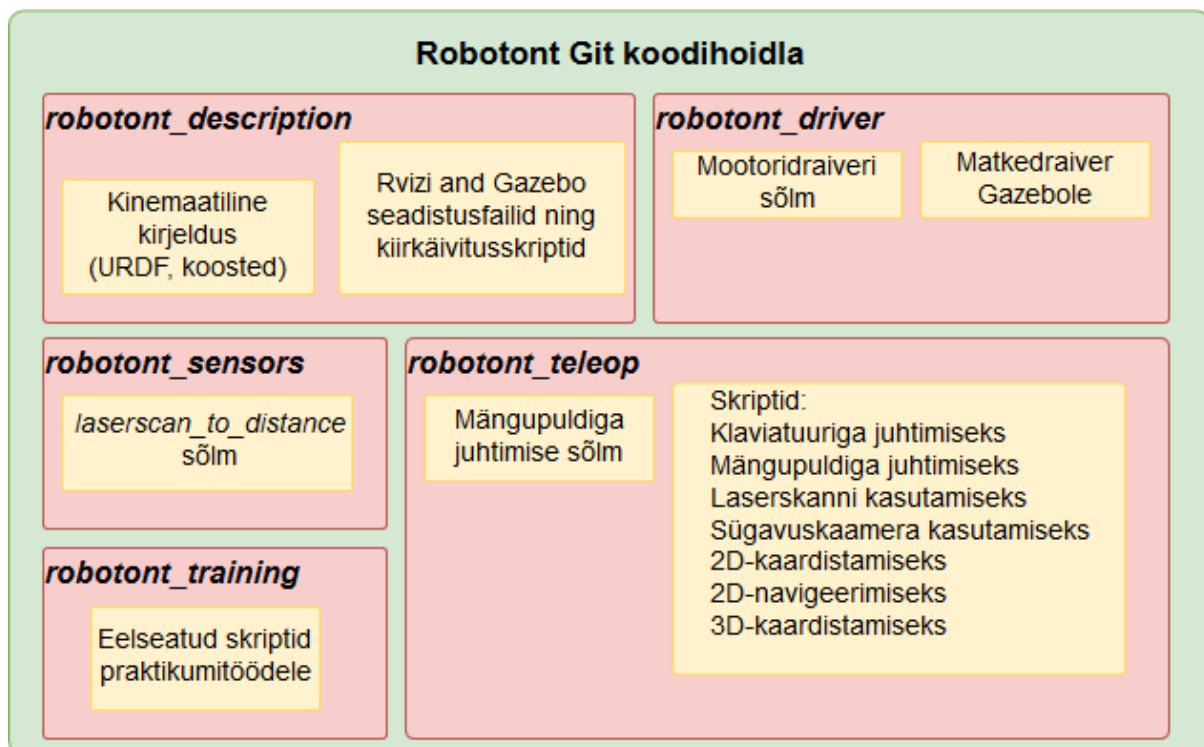
Lisaks eelnevale versioonile lisati ka E-Stop, millega lülitatakse vajadusel välja mootori kontrollerid ning seisatakse robot. Üheltpoolt annab see võimaluse mootoreid ja pardaarvutit igal hetkel eraldi välja lülitada, teisalt on E-Stop vajalik lahendus roboti väljalülitamiseks ka ohu olukorras, kus robot võib ennast või teisi vigastada.

4.3.6 Tarkvara ja juhendmaterjalid

Tarkvara ja juhendmaterjalide loomisega tegeles oma magistritöö käigus Madis Kaspar Nigol [77].

Valmis kaheksa praktikumitööd, kus tutvustatakse Linuxi ja ROSi keskkondade kasutamist, programmeerimist keeles Python ning õpetatakse muuhulgas 2D/3D kaardistamist ning autonoomselt navigeerimist.

Juhendmaterjalide jaoks arendati välja ROS põhine tarkvara, koos simulatsioonikeskkonnaga. Tarkvara ja juhendmaterjale testiti edukalt Tartu Ülikooli Narva Kolledžis õppeaines LOTI.05.080 Robotite programmeerimine ROS vahenditega (3 EAP). Tarkvara struktuuri kirjeldab joonis 4.5.



Joonis 4.5: Robotondi tarkvara struktuur [78]

4.3.7 Tulemused ja järeldused

Käesoleva magistritöö tulemusena valmis 17 robotit (Joonis 4.6), millest 15ga viidi läbi kursus Tartu Ülikooli Narva Kolledžis – „LOTI.05.080 Robotite programmeerimine ROS vahenditega“

Lisaks pilootkursusele TÜ Narva Kolledžis on osaletud mitmetel väljapanekutel ja läbi viidud töötube.



Joonis 4.6: 17 Robotont gen 2

Täis akuga suutis Robotont koormatud tingimustel (3D kaardistamine) sõita üle 2 tunni.

Mehaanika disain on tõestanud oma töökindlust:

- Kui gen 1 puhul tulid juba pärast esimest töötuba 2 ratast alt ära, siis terve Narva Kolledži kursuse vältel antud probleemi ei esinenud kordagi
- Hoolduseks on rattad hästi eemaldatavad, et ratta rullikuid ajaga kogunenud mustusest puhastada

Puudustest võib välja tuua aku raskesti kinnitatavuse ja eemaldamise, sest disain on osutunud „liiga täpseks“ ehk aku ümber pole piisavalt vaba ruumi.

Samuti osutus mehaanikadisain toodetavuse suhtes planeeritust keerulisemaks. Näiteks rattamooduli disaini puhul on kalasaba tappide tootmine ka CNC freespingiga väga aeganõudev protsess ning asendatakse järgmistes versioonides risttapiga.

5 Robotondi dokumentatsioon

Üheks lõputöö eesmärgiks oli dokumenteerida Robotondi erinevad arendusetapid ja seada üles süsteem, mis koondaks kogu Robotondi projekti vältel arendatud tehnilised lahendused nii elektroonika, mehaanika, tarkvara kui ka õppematerjalide jaoks. Selline kogu Robotondi arengut hõlmava süsteemi loomine võimaldab erinevaid detaile taastoota nii, et saab kindel olla toodetava komponendi generatsiooni/versiooni/revisjoni õigsuses ning ka seda, kuidas projektiga tulevikus edasi liigutakse. Alljärgnev sisaldab dokumentatsiooni halduse häid tavasid, andmete kogumise metoodikat, keskkonna valikut, viiteid ja pikaajaseks haldamiseks loodud üldise struktuuri kirjeldust.

5.1 Head dokumentatsiooni halduse tavad

1. Joonistest peab lisaks originaalformaadile olema salvestatud ka *.step fail [79], et seda oleks võimalik erinevates tarkvarades kasutada nagu näiteks SolidEdge, SolidWorks, AutoCad Fusion 360.

2. Kõik failinimed on nimetatud vastavalt nende sisule näiteks:

Main_frame_bottom – Main_ tegu on põhikoostu detailiga, frame_ põhiraami osa ning „bottom“ et asetseb koostus alumisel positsioonil.

R200_Camera – tegu on R200 tüüpi kaameraga

8mm_pipe_mount – On 8mm toru jaoks mõeldud kinnitus

3. Kõik üleliigsed failid, mida antud versiooni/generatsiooni robotondi tootmiseks ei kasutata, peavad olema kustutatud või eristavalt eraldatud nagu näiteks „Archive“ või „Extras“ kaustas.

Stiilinäide Failide sorteerimisest, kus erinevad failid on vastavalt alamkoostudena kaustadesse ära jagatud, et neid oleks parem hallata:

Robotont generatsioon 1 joonised

Main_Platform_Ver_1

1 Main Assembly – siin on kõik failid, mis kuuluvad otseselt kere külge, aga mitte ühtegi teise moodulisse, samuti on selles ka roboti põhikoost

2 Wheel module – siia kausta kuuluvad kõik, mis on seotud rattamooduliga nagu näiteks mootor, ratas, ratta alamkoostud ning terve rattamooduli koost

3 Camera Assembly – siin kaustas on kõik kaamera kinnituslahenduse juurde kuuluv

4 Battery Assembly – kõik, mis on aku kinnitusega seotud

Drafts and STL – tootmiseks vormistatud 2D joonised, samuti ka mudelid, mida kasutatakse 3D printimiseks *.stl failid,

Extras – kõik failid, mida võib vaja minna, kuid pole antud koostus kasutusel

4. Failide nimetused on inglise keelsed, et vältida täpitähti ning oleks kergesti arusaadav ka eesti keelt mittekõnelevatele inimestele.
5. Selleks, et anda robotplatvormile järgnev täisarvuline generatsiooni number, näiteks Robotont generatsioon 3, peavad muudatused olema tehtud üle 50% robotil kasutatud komponentidest. Näiteks kui järgmisel robotil muutub vaid rattamooduli disain ning kere disain jääb samaks, siis on tegemist generatsioon 2.1-ga, mitte veel 3.0, sest tegemist on väiksemat sorti muudatusega. Küll aga, kui on tegemist on väga sisulise muudatusega, näiteks muutub pardaarvuti, siis peaks see muutus ka versiooni numbris või eristavalt kajastuma.

5.2 Metoodika ja keskkonna valik

Dokumentide hoiustamiseks kasutatakse Tartu Ülikooli pilvelahendust NextCloud [80], koodihoidlana GitHub-i [81] ja arvutustabelite jaoks Google lahendust Drive [82] lahendust. Otselingid eelnevalt nimetatud keskkondadele on koondatud aadressil <https://sisu.ut.ee/robotont>

NextCloud – on TÜ poolt pakutav pilveteenus, kus faile hoitakse TÜ enda serveris. Valik TÜ serveris hoiustamiseks tehti turvalisuse ja andmevahetuskiiruse huvides. Siia on antud töö raames kogutud kõik suuremamahulised failid nagu näiteks töö- ja koostejoonised.

GitHub – on üks maailma populaarsemaid koodihoidlaid ning on suures osas vabavarana kasutamiseks. GitHub-i koodihoidlas asub kogu Robotondi tarkvara arendus nii juhkontrolleri püsivara kui ka ROSi kimpude ja teekide arendus.

Google Drive –pilveteenus, mis võimaldab platvormist sõltumatut dokumendihaldust ja veebipõhist redigeerimist. Sellest lähtuvalt on sinna talletatud pikemad tekstifailid ning tabelid.

Esmajärgus oli vaja kokku koguda vajalik informatsioon eelnevatest Robotexil osalenud riistvara platvormidest ning see korrastada. Andmete kogumisega alustati TÜ digilabori kodulehelt [50], kust saadi informatsioon eelnevate aastate mootorikontrollerite, juhtkontrollerite, kere disaini ja muu riistvara kohta. Kõige kohta, mis Robotexi erinevatel robotitel on kasutatud ja võimaldaksid Robotont gen 1 toota. Seejärel sorteeriti saadud robotidetailid Robotont generatsioon 1 kausta NextCloudi pilveruumis, nimetati failid korrektsete nimedega ning jäeti segaduse vältimiseks välja detailid, mida konkreetsetes koostudes ei kasutata. Seejärel loodi vastavad koostud ja BOM nimekiri koostus kasutatud failidega.

Pärast erinevate keskkondade ülesseadmist koondati kogu dokumentatsioon sisu.ut.ee/robotont lehele.

5.3 Dokumentide haldamise struktuur

- sisu.ut.ee/robotont

- **Lõputööd** – Siin teegis on kõik Robotondiga seotud lõputööd
- **Tehniline dokumentatsioon** – komponentide nimekirjad, viited nende spetsifikatsioonile ning tehnilised joonised roboti detailide tootmiseks ja koostamiseks
 - **Robotont generatsioon 2 BOM** – täielik komponentide nimistu, millest Robotont gen 2 robot koosneb
 - **Robotont generatsioon 2 joonised** – kõik joonised ja juhendid, mille järgi on Robotont gen 2 toodetud ja koostatud
 - **Robotont generatsioon 1 BOM** – täielik komponentide nimistu, millest Robotont gen 1 robot koosneb
 - **Robotont generatsioon 1 joonised** – kõik joonised ja juhendid, mille järgi on Robotont gen 1 toodetud ja koostatud
- **Õppematerjalid**
 - **Robotont generatsioon 2 praktikumi juhendid** – Siin paiknevad õppematerjalid, millega viidi läbi Tartu Ülikooli Narva Kolledžis kursust „Robotite programmeerimine ROS vahenditega“

- **Robotont generatsioon 1 õppematerjalid** – Siin paiknevad õppematerjalid, mis spetsiifiliselt Robotont gen 1 jaoks tehtud

6 Arutelu ja järeldused

Magistritöö käigus said kõik Robotont gen 1-le ja 2-le seatud eesmärgid täidetud.

Gen 1 eesmärk oli pakkuda õppuritele reaalne ROSi kasutamise kogemus, mida ka väljatöötatud töötubadega tehti.

Robotont gen 1 testimise järel tehti järeldused, millest lähtuvalt seati nõudmised Robotont gen 2-le. Peamiseks eesmärgiks oli luua stabiilne versioon Robotondist.

Gen 2 arengus keskendutakse spetsiifilisemalt juba riistvara arendusele, antud magistritöö raames täpsemalt mehaanika arendusele. Samuti loodi ühtne dokumenteeritud struktuur, mis võimaldab Robotondi projekti süstematiseeritud edasist arendust ja annab selge ülevaate varasemast tööst.

Lõpetuseks võib väita, et gen 2 on võrreldes eelneva generatsiooniga oluliselt stabiilsem. Lahendati rataste kinnitamise probleemid ning tänu aku paigutamisele roboti keskele on odomeetria täpsem. Samuti vähendas kaamera jäigem kinnitus vibratsiooni, mistõttu on kaamerast edastatava punktipilve täpsus suurem ning 2D pilt stabiilsem. Siiski esineb mõningaid puudujääke, millega tegeletakse juba gen 2.1 või gen 3 raames. Näiteks tuleb aku ühendamise ja vahetamise teha mugavamaks. Samuti saab keredetaile optimeerides kokku hoida tootmiskuludelt. See on vajalik a) suuremate partiide tootmiseks ja b) et suurendada potentsiaalsete ettevõtete nimekirja, kes on valmis keredetaile tootma.

Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö käigus korraldati kuue Robotont gen 1 koostelahendused, paigaldati töötubade läbiviimiseks vajalik tarkvara ROS Kinetic Kame koos vajalike ROSi kimpude ja Linuxi programmidega. Loodi gen 1 juhendmaterjalid, mille põhjal viidi läbi töötavad Robotexil 2017 ning Tartu Raatuse Koolis. Testimise tulemustest tehti järeldused, millest saadi sisend Robotont gen 2 arenduseks. Loodi Robotont gen 2 mehaanika disain ja lahendus. Toodeti gen 2 disaini järgi 17 robotit ning loodi struktureeritud dokumendihalduse süsteem, mille raames pandi paika järgitavad tavad ka järgnevate Robotondi generatsioonide arenduseks.

Robotont gen 2ga on käidud erinevatel väljapanekutel, tehtud erinevaid töötube ning viidud läbi TÜ Narva Kolledži kursus „Robotite programmeerimine ROS vahenditega“. Testimise tulemusena on selgunud, et mehaanika arendus on õnnestunud ning on edukalt nii töötavad kui ka kursuse vastu pidanud. Siiski on avastatud ka mõningased puudujäägid, mille likvideerimisega tegeletakse juba gen 2.1 tootmisel.

Dokumentatsiooni halduse huvides koguti TÜ Robotiklubi wikipedia lehelt infot, mis korraldati ning paigutati struktureeritud TÜ NextCloudi kausta, et kogu informatsioon eelnevate aastate Robotexi platvormi ning Robotont gen 1 kohta oleks ühest kohast leitav ning päevakohane.

Antud magistritöö omab suurt väärtust, sest koondab endas kogu Robotondi arengut TÜ Robotexist Robotont gen 2ni ehk seni stabiilseima Robotondi versioonini ning seab konventsioonid järgnevate robotite arendamiseks.

Viited

- [1] Summary E, Robotics W, Robots I. WR 2018 Industrial Robots Executive Summary. 2018;
- [2] International Federation of Robotics. Executive Summary World Robotics 2018 Service Robots. World Robot. Rep. - Exec. Summ. [Internet]. 2018;11–16. Available from: https://ifr.org/downloads/press2018/Executive_Summary_WR_Service_Robots_2018.pdf.
- [3] Eguchi A. Bringing Robotics in Classrooms. In: Khine MS, editor. Robot. STEM Educ. [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2017. p. 3–32. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-57786-9>.
- [4] Shead S. Amazon now has 45,000 robots in its warehouses [Internet]. 2017 [cited 2019 Apr 23]. Available from: <https://www.businessinsider.com/amazons-robot-army-has-grown-by-50-2017-1>.
- [5] Frey CB, Osborne MA. THE FUTURE OF EMPLOYMENT: HOW SUSCEPTIBLE ARE JOBS TO COMPUTERISATION? 2013;
- [6] Sergeyev A. Meeting Twenty-first Century Robotics and Automation Workforce Needs in the USA. In: Khine MS, editor. Robot. STEM Educ. [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2017. p. 171–194. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-57786-9>.
- [7] First Lego League homepage [Internet]. 2019 [cited 2019 May 20]. Available from: <http://www.firstlegoleague.org/>.
- [8] Intervjuu Heilo Altiniga MTÜ Robootika. 2019.
- [9] Bossi D. First community Conference- Orldando, Florida. First community Conf. Orldando, Florida. 2018.
- [10] Bonelli C. Amazon Uses More Than 100,000 Robots Worldwide at Their Fulfillment Centers [Internet]. 2019. p. <https://topnewsgazette.com/business/amazon-uses-more-than-100000-robots-worldwide-at-their-fulfillment-centers/>. Available from: <https://topnewsgazette.com/business/amazon-uses-more-than-100000-robots-worldwide-at-their-fulfillment-centers/>.
- [11] Delivery Robots Market by Load Carrying Capacity, Component, Number of Wheels, End-User Industry, and Geography - Global Forecast 2024 [Internet]. 2019 [cited 2019 Apr 24]. Available from: https://www.researchandmarkets.com/research/twn675/34_billion?w=12.
- [12] Pepper [Internet]. [cited 2019 May 7]. Available from: <https://www.softbankrobotics.com/emea/en/pepper>.
- [13] IPA Fraunhofer, Mojin Robotics. Care-O-bot 4 [Internet]. 2017 [cited 2019 May 2]. Available from: <https://robots.ieee.org/robots/careobot/>.
- [14] Obert C. Personal Delivery Robot – Starship Technologies [Internet]. 2016 [cited 2019 May 2]. Available from: <https://www.engineeringclicks.com/delivery-robot/>.
- [15] About ROS [Internet]. [cited 2019 May 6]. Available from: <http://www.ros.org/about-ros/>.
- [16] 8 reasons why you should use ROS for robotics projects [Internet]. [cited 2019 Apr 9]. Available from: <https://niryo.com/2018/01/8-reasons-use-ros-robotics-projects/>.
- [17] Pyo Y, Cho H, Ryuwoon I, et al. Robot Operating System ROS. A Handb. Writ. by TurtleBot3 Dev. Robot Program. From basic concept to Pract. Program. Robot Appl. [Internet]. 2017. p. 9–21. Available from: www.robotis.com.
- [18] Is Ros for me [Internet]. [cited 2019 May 6]. Available from: <http://www.ros.org/is-ros-for-me/>.
- [19] Foote T. ROS Community Metrics Report 2018. 2018.

- [20] Gerkey B, Conley K, Foote T. ROS Community Metrics Report 2011 [Internet]. 2011. Available from: <http://download.ros.org/downloads/metrics/metrics-report-2014-07.pdf>.
- [21] Foote T. ROS Metrics Report 2015 [Internet]. 2015. Available from: <http://wiki.meego.com/Metrics>.
- [22] Foote T. ROS Community Metrics Report 2017 [Internet]. 2017. Available from: <http://download.ros.org/downloads/metrics/metrics-report-2014-07.pdf>.
- [23] About FTPs [Internet]. [cited 2019 May 6]. Available from: <https://rosindustrial.org/ric/about-ftps>.
- [24] ROS -industrial Consortium Description [Internet]. 2019 [cited 2019 May 6]. Available from: <https://rosindustrial.org/ric>.
- [25] ROS-industrial current members [Internet]. 2019 [cited 2019 May 5]. Available from: <https://rosindustrial.org/ric/current-members>.
- [26] Crowe S. ROS for Windows 10: Microsoft gets back into robotics [Internet]. 2018 [cited 2018 May 5]. Available from: <https://www.therobotreport.com/ros-for-windows-microsoft-robotics/>.
- [27] Zhang A, Yu Z. Teacher Robot, a new concept of modern teaching. 2011 6th Int. Conf. Comput. Sci. Educ. [Internet]. IEEE; 2011. p. 691–696. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6028732/>.
- [28] Belpaeme T, Kennedy J, Ramachandran A, et al. Social robots for education: A review. Sci. Robot. [Internet]. 2018;3:eaa5954. Available from: <http://robotics.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/scirobotics.aaa5954>.
- [29] Goel AK, Polepeddi L. Jill Watson: A Virtual Teaching Assistant for Online Education. Georg. Inst. Technol. [Internet]. 2016; Available from: <https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/59104/goelpolepeddi-harvardvolume-v7.1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [30] Aldebaran Nao [Internet]. [cited 2019 May 9]. Available from: http://doc.aldebaran.com/2-1/home_nao.html.
- [31] RoboThespian [Internet]. [cited 2019 May 9]. Available from: <https://www.engineeredarts.co.uk/robothespian/>.
- [32] Hashimoto T, Kobayashi H, Polishuk A, et al. Elementary science lesson delivered by robot. 2013 8th ACM/IEEE Int. Conf. Human-Robot Interact. [Internet]. IEEE; 2013. p. 133–134. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6483537/>.
- [33] Yoon H. A relation between young children's computer utilization and their use of education robots. 2011 6th ACM/IEEE Int. Conf. Human-Robot Interact. 2011;291.
- [34] 2014-2018 PT toetust saanud haridusasutused. 2018.
- [35] Lego Education WeDo 2.0 Core Set [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <https://education.lego.com/en-us/products/lego-education-wedo-2-0-core-set/45300>.
- [36] Makeblock mBot [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <https://www.makeblock.com/steam-kits/mbot>.
- [37] Best Robot Kits for Kids [Internet]. [cited 2019 May 19]. Available from: <https://www.tomsguide.com/us/pictures-story/1021-best-robot-kits.html#s1>.
- [38] Top 10 programmable robot kits for education in 2018 [Internet]. [cited 2019 May 19]. Available from: <https://www.dobot.cc/resource/programmable-robot-kits-for-education-in-2018.html>.
- [39] Amazon statistics about Robotics.
- [40] LEGO MINDSTORMS EV3 [Internet]. p. <https://education.lego.com/en-us/products/lego-min>. Available from: <https://education.lego.com/en-us/products/lego-mindstorms-education-ev3-core-set-/5003400>.

- [41] mBot pilt [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: http://img.dxcn.com/productimages/sku_916500664_1.jpg.
- [42] ROS robots [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <https://robots.ros.org/>.
- [43] Raspberry Pi 3 Model B+ [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>.
- [44] OpenCR 1.0 [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: http://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/appendix_opencr1_0/.
- [45] 2D LIDAR LDS-01 [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: http://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/appendix_lds_01/.
- [46] Dynamixel XM430-W210 [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <http://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xm430-w210/>.
- [47] Dynamixel XL430-W250 [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <http://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xl430-w250/>.
- [48] Gatesichapakorn S, Takamatsu J, Ruchanurucks M. ROS based Autonomous Mobile Robot Navigation using 2D LiDAR and RGB-D Camera. 2019 First Int. Symp. Instrumentation, Control. Artif. Intell. Robot. [Internet]. IEEE; 2019. p. 151–154. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8645984/>.
- [49] Turtlebot official homepage [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <https://www.turtlebot.com/>.
- [50] Ametlik Digilabori Wikipedia lehekülg [Internet]. [cited 2019 May 12]. Available from: <https://digilabor.ut.ee/index.php/Esileht>.
- [51] Kruus K-G. Jalgpalliroboti loõgimahanismi elektroonikalahendus. 2013; Available from: <http://dSPACE.ut.ee/handle/10062/32440>.
- [52] Robotexi ametlik Wikipedia lehekülg [Internet]. [cited 2019 May 9]. Available from: <https://et.wikipedia.org/wiki/Robotex>.
- [53] Kuusk J, Vaher H, Uin J, et al. Võistkond kohuke aruanne [Internet]. 2005. [cited 2019 May 9]. Available from: <http://digi.physic.ut.ee/mypages/oppetoo/robotex//2006//aruanded//2005/kohuke/kohuke2005.html>.
- [54] Jezov J, Kärberg T, Prii A, et al. “All Systems & Co” aruanne [Internet]. 2005 [cited 2019 May 9]. Available from: <http://digi.physic.ut.ee/mypages/oppetoo/robotex//2006//aruanded//2005/asco/index.html>.
- [55] Robotex [Internet]. [cited 2019 Apr 8]. Available from: <https://digilabor.ut.ee/index.php/Robotex>.
- [56] Vellerind R. Avatud robotiarendusplatvormi ROS võimekuse loomine Tartu Ülikooli Robotexi robotikaplatvormile. 2017;
- [57] 19:1 Pololu motor 37Dx68L mm with 64 CPR Encoder [Internet]. [cited 2019 May 9]. Available from: <https://www.pololu.com/product/2822>.
- [58] Vex Robotics 2.75" omniwheels [Internet]. [cited 2019 May 9]. Available from: <https://www.vexrobotics.com/vexedr/products/accessories/motion/edr-wheels.html>.
- [59] Intel RealSense camera R200 [Internet]. [cited 2019 May 12]. Available from: <https://ark.intel.com/content/www/us/en/ark/products/92256/intel-realsense-camera-r200.html>.
- [60] Maidla M. Avatud robotiarendusplatvormi Robotont omniliikumise ja odomeetria arendamine. 2018;
- [61] TÜ Robotex robot Mbed mainboard [Internet]. [cited 2019 May 9]. Available from: https://digilabor.ut.ee/index.php/Mbed_mainboard.
- [62] Nucleo L476RG [Internet]. [cited 2019 May 12]. Available from: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-l476rg.html>.

- [63] Intel RealSense overview [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <https://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/realsense-overview.html>.
- [64] ROS Kinetic Kame [Internet]. 2016. [cited 2019 May 12]. Available from: <http://wiki.ros.org/kinetic>.
- [65] ROS-kinetic-Serial [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <http://wiki.ros.org/rosterial>.
- [66] ROS-kinetic-joy [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <http://wiki.ros.org/joy>.
- [67] ROS RealSense [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <http://wiki.ros.org/RealSense>.
- [68] hector_slam [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: http://wiki.ros.org/hector_slam/Tutorials/MappingUsingLoggedData.
- [69] rtabmap_ros [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: https://github.com/introlab/rtabmap_ros.
- [70] ROS-joystick-drivers [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: http://wiki.ros.org/joystick_drivers.
- [71] Teleop_twist_keyboard [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: http://wiki.ros.org/teleop_twist_keyboard.
- [72] OpenSSH [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <https://www.openssh.com/>.
- [73] ntpdate [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <https://linux.die.net/man/8/ntpdate>.
- [74] DroidTick [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <https://miguelangellv.wordpress.com/droidtick-en/>.
- [75] SolidEdge official [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <https://solidedge.siemens.com/en/>.
- [76] Chambers RW. The Journal of Timber Framing And Traditional Joinery. 1990; Available from: <http://www.logbuilding.org/Dovetails.JQsm.pdf>.
- [77] Nigol MK. Õppematerjalid robotplatvormile Robtont. Tartu Ülikool; 2019.
- [78] Robotont github [Internet]. 2019 [cited 2019 May 6]. Available from: <https://github.com/ut-ims-robotics/robotont>.
- [79] About STEP file [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <https://fileinfo.com/extension/step>.
- [80] UT Nextcloud [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <https://wiki.ut.ee/display/AA/Nextcloud>.
- [81] About Github [Internet]. [cited 2019 May 20]. Available from: <https://github.com/>.
- [82] About google drive.

Lisad

Lisa 1

Töö käigus välja töötatud õppematerjalid asuvad aadressil:
<https://sisu.ut.ee/robotont/oppematerjalid>

Lisa 2

Töö käigus välja töötatud joonised ja komponentide nimekiri asuvad aadressil:
<https://sisu.ut.ee/robotont/tehniline-dokumentatsioon>

Lihthitsents

Lihthitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, _____ Renno Raudmäe _____,
(*autori nimi*)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihthitsentsi) minu loodud teose

_____ AVATUD ROBOTPLATVORM ROBOTONT _____

—, _____
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendajad on _____ Karl Kruusamäe ja Veiko Vunder _____,
(*juhendaja nimi*)

6. reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

7.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

8.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

9.

4. Kinnitan, et lihthitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

/Renno Raudmäe/
20.05.2019